

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TATIANI ZANONI

METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DE
LIGAÇÕES METÁLICAS PARAFUSADAS VIGA-PILAR COM CHAPA
DE TOPO NÃO ESTENDIDA

CURITIBA

2018

TATIANI ZANONI

**METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DE
LIGAÇÕES METÁLICAS PARAFUSADAS VIGA-PILAR COM CHAPA
DE TOPO NÃO ESTENDIDA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia.

Orientador: Prof Dr Marco André Argenta

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

Z33m

Zanoni, Tatiani

Metodologia para a determinação da rigidez de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo não estendida [recurso eletrônico] / Tatiani Zanoni. – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2018.

Orientador: Marco André Argenta .

1. Estruturas metálicas. 2. Aço – Estruturas. 3. Ligações metálicas. 4. Vigas. 5. Chapas de metal. 6. Ligações parafusadas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Argenta, Marco André. III. Título.

CDD: 624.182

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **TATIANI ZANONI** intitulada: **METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES METÁLICAS PARAFUSADAS VIGA-PILAR COM CHAPA DE TOPO NÃO ESTENDIDA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 12 de Novembro de 2018.


MARCO ANDRE ARGENTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


CARLOS EDUARDO ROSSIGALI

Avaliador Externo (UFPR)


RICARDO PIERALISI

Avaliador Interno (UFPR)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação da rigidez rotacional de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo não estendida, através de análise numérica tridimensional com elementos finitos e do método proposto pelo Eurocode 3. A elaboração de projetos estruturais ainda é feita considerando a simplificação do comportamento das ligações, porém atualmente os projetos estruturais demandam soluções mais eficientes e economicas, o que pode ser alcançado com a análise de ligações considerando a semirrigidez rotacional. Neste trabalho a simulação do carregamento da estrutura foi feita por uma análise numérica tridimensional com auxílio do software ANSYS®, onde foram medidas as deformações locais e globais dos elementos da ligação para o cálculo da rigidez rotacional. O foco principal deste trabalho é a análise da rigidez rotacional das ligações metálicas viga-pilar ligados por quatro parafusos, e a descrição do comportamento e influência de cada elemento que compõem a ligação na rigidez rotacional, de forma a acrescentar informações sobre o comportamento local dos elementos que formam a ligação e o comportamento global da estrutura. Para isso foram simulados modelos de ligação variando os perfis da viga e do pilar, a espessura da chapa de topo e o diâmetro dos parafusos, e foi feita a análise do efeito da variação destas dimensões no deslocamento das abas da mesa do pilar e da chapa de topo, no alongamento do fuste dos parafusos, na deformação da alma do pilar, na rotação local da ligação e na rotação global do pilar. Também foram propostas equações para delinear e simplificar o deslocamento da alma do pilar, mesa do pilar e chapa de topo.

Palavras-chaves: Ligações Metálicas Parafusadas; Chapa De Topo não estendida; Semirrigidez De Ligações;

ABSTRACT

This work presents a numerical analysis of the rotational stiffness of steel bolted beam to column connections with end plate, using a 3D numerical analysis with finite elements, and the method proposed by Eurocode 3. The design of structural projects is still made considering the simplification of the behavior of the connections, but currently the structural projects demand more efficient and economic solutions, which can be achieved with the analysis of the structure considering the semi-rigidity of the connection. In this work the 3D numerical analysis was made on the software ANSYS®, where the structural loading was simulated, and the connection local and global deformations for the calculation of the rotational stiffness were measured. The main focus of this work was analyzing the rotational stiffness of four bolts steel beam to column connections, and describe the behaviour and influence of each connection element in the rotational stiffness of the connection, in order to add information about the local behavior of the elements that constitute the connection and the overall behavior of the structure. In order to do this, the connection models were simulated varying the beam and column profiles, the thickness of the end plate, and the diameter of bolts, and it was also made an analysis of the effect of the variation of these dimensions on the displacement of the column flanges and of the flushed end plate, the elongation of the bolts shaft, the deformation of the column web, the local rotation of the connection and the global rotation of the column. Expressions were also proposed to delineate and simplify the displacement of the column web, column flange, and end plate.

Key-words: Steel Bolted Connections; Flushed End Plate; Semi Rigid Connections.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Comportamento de ligações semirrígidas	17
FIGURA 2 – Deformação rotacional de uma ligação	21
FIGURA 3 – Tipos de mola	22
FIGURA 4 – Representação da curva momento-rotação relativa para diversos tipos de ligação	22
FIGURA 5 – Diagrama de momentos fletores para pórtico com ligações rotuladas	23
FIGURA 6 – Diagrama de momentos fletores para pórtico com ligações engastadas	24
FIGURA 7 – Representação de uma barra com ligações semirrígidas	24
FIGURA 8 – Três estágios de comportamento da chapa de topo: (a) primeiro estágio/chapa espessa, (b) segundo estágio/chapa intermediária e (c) terceiro estágio/chapa fina	26
FIGURA 9 – Largura efetiva da região afetada pela força atuante no pilar, b_{eff}	31
FIGURA 10 – Dimensões t_w , h e d	32
FIGURA 11 – Regiões para verificação da resistência para ligação viga-coluna com chapa de topo	33
FIGURA 12 – Comprimento total de aperto	35
FIGURA 13 – Distâncias m_1 , m_2 , e e	35
FIGURA 14 – Braço de alavanca do binário tração/compressão	37
FIGURA 15 – Distribuição das forças nas linhas dos parafusos	37
FIGURA 16 – Limite de distribuição triangular de forças nos parafusos	38
FIGURA 17 – Etapas da verificação da capacidade resistente nas linhas de parafusos	39
FIGURA 18 – Perfis T equivalentes	39
FIGURA 19 – Possíveis modos de falha do perfil T equivalente	40
FIGURA 20 – Relação dos modos de ruptura com a geometria da ligação	40
FIGURA 21 – Geometria da ligação	42
FIGURA 22 – Valores de α para linha de parafusos na região enrijecida	44
FIGURA 23 – Dispersão das tensões para a verificação do esmagamento na alma do pilar	45
FIGURA 24 – Geometria dos elementos tridimensionais <i>solid186</i> e <i>solid187</i>	48
FIGURA 25 – Geometria dos elementos de contato <i>conta174</i> e <i>targe170</i>	49
FIGURA 26 – Dimensões padrão das ligações	50
FIGURA 27 – Marcação das linhas para extração dos dados	51
FIGURA 28 – Ângulos de rotação da ligação	52
FIGURA 29 – Detalhe da flambagem local da mesa superior da viga	53
FIGURA 30 – distância b	54

FIGURA 31 – Representação da variação da deformação da alma de acordo com a variação da altura da viga e g	56
FIGURA 32 – Deformação apresentada pelas variações da ligação CVS350X105_VS250	57
FIGURA 33 – Deformação da alma do pilar nas ligações feitas com a viga VS500X61, variando espessura da chapa de topo e distância horizontal entre parafusos	57
FIGURA 34 – Deslocamento das abas da mesa das ligações com pilar CVS400X87, variando a altura da viga e mantendo a distância horizontal entre os parafusos de $g = 100mm$	58
FIGURA 35 – Deslocamento das abas da mesa das ligações com pilar CVS400X87, variando a altura da viga e mantendo a distância horizontal entre os parafusos de $g = 120mm$	58
FIGURA 36 – Deslocamento da mesa do pilar nas ligações com as vigas VS350X51, com aumento da distância horizontal entre parafusos g	59
FIGURA 37 – Deslocamento da mesa do pilar nas ligações com as vigas VS500X61, com aumento da distância horizontal entre parafusos g	59
FIGURA 38 – distâncias h_1 e g'	60
FIGURA 39 – Idealização do comportamento das mesas do pilar e chapa de topo .	60
FIGURA 40 – Correlação entre P_{cal} e P_{eq} para a mesa das ligações com o pilar CVS400x87	61
FIGURA 41 – Deslocamento total da ligação (a) linhas verticais, (b) linha horizontal parafusos superiores, (c) linha horizontal parafusos inferiores, ligação CVS250X47_VS300X25_4fi16_ch12	63
FIGURA 42 – Ângulo de rotação, ligação CVS250X47_VS300X25_4fi16_ch12 . .	64
FIGURA 43 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X83_VS500X61_4φ19_ch12	64
FIGURA 44 – Ângulo de rotação, lig CVS300X83_VS500X61_4φ19_ch19	65
FIGURA 45 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X94_VS450X51_4φ19_ch12	66
FIGURA 46 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400X87_VS500X61_4φ19_ch12+g	67
FIGURA 47 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350X118_VS250X37_4φ16_ch19	67
FIGURA 48 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350X98_VS250X37_4φ16_ch19	68
FIGURA 49 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X94_VS500X61_4φ19_ch19- g	69
FIGURA 50 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	69
FIGURA 51 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15	70
FIGURA 52 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12	70
FIGURA 53 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22	71
FIGURA 54 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	72

FIGURA 55 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x47_VS300x25_4φ16_ch12	72
FIGURA 56 – Deslocamento total, ligação CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15 . .	89
FIGURA 57 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15	89
FIGURA 58 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15	90
FIGURA 59 – Ângulo de rotação, ligação CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15 . . .	90
FIGURA 60 – Deslocamento total, ligação CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15 . .	91
FIGURA 61 – Deformação alma do pilar, lig CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15 .	91
FIGURA 62 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15	92
FIGURA 63 – Deslocamentos mesa do pilar , lig CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15	92
FIGURA 64 – Rotação da ligação CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15	92
FIGURA 65 – Deslocamentos ligação CVS300x47_VS150x19_4φ12_ch9	93
FIGURA 66 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x47_VS150x19_4φ12_ch9 . .	93
FIGURA 67 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x47_VS150x19_4φ12_ch9	94
FIGURA 68 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x47_VS150x19_4φ12_ch9	94
FIGURA 69 – Ângulo de rotação, lig CVS300x47_VS150x19_4φ12_ch9	94
FIGURA 70 – Deslocamentos ligação CVS300x67_VS200x26_4φ16_ch15	95
FIGURA 71 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x67_VS200x26_4φ16_ch15 .	95
FIGURA 72 – Deslocamentos chapa de topo , lig CVS300x67_VS200x26_4φ16_ch15	96
FIGURA 73 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x67_VS200x26_4φ16_ch15	96
FIGURA 74 – Ângulo de rotação, lig CVS300x67_VS200x26_4φ16_ch15	96
FIGURA 75 – Deslocamentos ligação CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15	97
FIGURA 76 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15 .	97
FIGURA 77 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15	98
FIGURA 78 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15	98
FIGURA 79 – Ângulo de rotação, lig CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15	98
FIGURA 80 – Deslocamentos ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15	99
FIGURA 81 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15 .	99
FIGURA 82 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15	100
FIGURA 83 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15	100
FIGURA 84 – Ângulo de rotação, lig CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15	100
FIGURA 85 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12	101
FIGURA 86 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12	101
FIGURA 87 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12 .	101
FIGURA 88 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12	102
FIGURA 89 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12	102
FIGURA 90 – Ângulo de rotação, lig CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12	102
FIGURA 91 – Deslocamentos ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12	103
FIGURA 92 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12 .	103

FIGURA 93 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12	104
FIGURA 94 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12	104
FIGURA 95 – Ângulo de rotação, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12	104
FIGURA 96 – Deslocamentos ligação CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19	105
FIGURA 97 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19 .	105
FIGURA 98 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19	106
FIGURA 99 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19	106
FIGURA 100 – Ângulo de rotação, lig CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19	106
FIGURA 101 – Deformação alma do pilar, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g	107
FIGURA 102 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha hori- zontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19- g	107
FIGURA 103 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha hori- zontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19- g	107
FIGURA 104 – Ângulo de rotação, lig CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g	108
FIGURA 105 – Deslocamento total dos pontos das linhas vertical e da linhas horizon- tais na altura dos parafusos da ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19	108
FIGURA 106 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19	109
FIGURA 107 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19	109
FIGURA 108 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19	109
FIGURA 109 – Ângulo de rotação, lig CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19	110
FIGURA 110 – Deformação alma do pilar, lig CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19 .	110
FIGURA 111 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19	111
FIGURA 112 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19	111
FIGURA 113 – Ângulo de rotação, lig CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19	111
FIGURA 114 – Deslocamentos ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16	112
FIGURA 115 – Deformação alma do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19	112
FIGURA 116 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19	113
FIGURA 117 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19	113
FIGURA 118 – Ângulo de rotação, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16	113
FIGURA 119 – Deslocamentos ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch15	114
FIGURA 120 – Deformação alma do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch15 .	114
FIGURA 121 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch15	115
FIGURA 122 – Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch15	115
FIGURA 123 – Ângulo de rotação, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch15	115
FIGURA 124 – Deslocamentos ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g . . .	116
FIGURA 125 – Deformação alma do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g	116
FIGURA 126 – Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g	117

FIGURA 127–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g	117
FIGURA 128–Ângulo de rotação, lig CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g . . .	117
FIGURA 129–Deslocamentos ligação CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19	118
FIGURA 130–Deformação alma do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19	118
FIGURA 131–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19	119
FIGURA 132–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19	119
FIGURA 133–Ângulo de rotação, lig CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19	119
FIGURA 134–Deslocamentos ligação CVS350x105_VS300x37_4φ16_ch19	120
FIGURA 135–Deformação alma do pilar, lig CVSCVS350x105_VS300x37_4φ16_ch19	120
FIGURA 136–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x105_VS300x37_4φ16_ch19	121
FIGURA 137–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x105_VS300x37_4φ16_ch19	121
FIGURA 138–Ângulo de rotação, lig CVS350x105_VS300x37_4φ16_ch19	121
FIGURA 139–Deformação alma do pilar, lig CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19	122
FIGURA 140–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19	122
FIGURA 141–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19	122
FIGURA 142–Ângulo de rotação, lig CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19	123
FIGURA 143–Deslocamentos ligação CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22	123
FIGURA 144–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22	124
FIGURA 145–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22	124
FIGURA 146–Ângulo de rotação, lig CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22	124
FIGURA 147–Deslocamentos ligação CVS350x118_VS450x71_4φ19_ch22	125
FIGURA 148–Deformação alma do pilar, lig CVS350x118_VS450x71_4φ19_ch22	125
FIGURA 149–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS350x118_VS450x71_4φ19_ch22	126
FIGURA 150–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS350x118_VS450x71_4φ19_ch22	126
FIGURA 151–Ângulo de rotação, lig CVS350x118_VS450x71_4φ19_ch22	126
FIGURA 152–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12	127
FIGURA 153–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12 .	127
FIGURA 154–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12	128
FIGURA 155–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12	128
FIGURA 156–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12	128
FIGURA 158–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g	129
FIGURA 157–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g	129
FIGURA 159–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g	130
FIGURA 160–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g	130
FIGURA 161–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g	130
FIGURA 162–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12	131
FIGURA 163–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12 .	131

FIGURA 164–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12	132
FIGURA 165–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12	132
FIGURA 166–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12	132
FIGURA 167–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g	133
FIGURA 168–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g	133
FIGURA 169–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12- g	134
FIGURA 170–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12- g	134
FIGURA 171–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g	134
FIGURA 172–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12	135
FIGURA 173–Deslocamentos ligação Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g	135
FIGURA 174–Deslocamentos chapa de topo , lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12	136
FIGURA 175–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12	136
FIGURA 176–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12	136
FIGURA 177–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	137
FIGURA 178–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	137
FIGURA 179–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	138
FIGURA 180–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	138
FIGURA 181–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	138
FIGURA 182–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g	139
FIGURA 183–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g	139
FIGURA 184–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12- g	140
FIGURA 185–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12- g	140
FIGURA 186–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g	140
FIGURA 187–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12	141
FIGURA 188–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12	141
FIGURA 189–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12	142
FIGURA 190–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12	142
FIGURA 191–Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12	142
FIGURA 192–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12	143
FIGURA 193–Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12	143
FIGURA 194–Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12	144
FIGURA 195–Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12	144
FIGURA 196–Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12	144
FIGURA 197–Deslocamentos ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	145

FIGURA 198– Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g145	
FIGURA 199– Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g146	
FIGURA 200– Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g146	
FIGURA 201– Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global,	
CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g	146
FIGURA 202– Deslocamentos ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g	147
FIGURA 203– Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g	147
FIGURA 204– Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha hori-	
zontal dos parafusos superiores, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-	
g	148
FIGURA 205– Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha hori-	
zontal dos parafusos superiores, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-	
g	148
FIGURA 206– Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global,	
CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g	148
FIGURA 207– Deslocamentos ligação CVS400x87_VS500x61_4φ19_ch12	149
FIGURA 208– Deformação da alma do pilar da ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12	149
FIGURA 209– Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12	150
FIGURA 210– Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12	150
FIGURA 211– Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global,	
CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12	150
FIGURA 212– Deformação alma do pilar, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g	151
FIGURA 213– Deslocamentos chapa de topo, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g	151
FIGURA 214– Deslocamentos mesa do pilar, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g	151
FIGURA 215– Ângulo de rotação, lig CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g . . .	152

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Fator de rigidez k_i para ligações soldadas	29
TABELA 2	–	Verificações de resistência nos elementos da ligação	33
TABELA 3	–	Fatores k_i e μ_i	34
TABELA 4	–	Comprimento equivalente para linhas de parafusos atuando isoladas	43
TABELA 5	–	Propriedades mecânicas do aço dos perfis e dos parafusos	47
TABELA 6	–	Dimensões dos perfis das ligações	81
TABELA 6	–	Dimensões dos perfis das ligações	82
TABELA 7	–	Coeficientes da equação de aproximação da deformação da alma do pilar	82
TABELA 7	–	Coeficientes da equação de aproximação da deformação da alma do pilar	83
TABELA 8	–	P equivalente	83
TABELA 8	–	P equivalente	84
TABELA 8	–	P equivalente	85
TABELA 9	–	Semirrigidez das ligações pelo método Eurocode-3 (2005) e Modelo 3D	85
TABELA 9	–	Semirrigidez das ligações pelo método Eurocode-3 (2005) e Modelo 3D	86
TABELA 10	–	Rotação global teórica do pilar com ligação engastada e rotação global do pilar obtida no Modelo tridimensional, em radianos	87
TABELA 10	–	Rotação global teórica do pilar com ligação engastada e rotação global do pilar obtida no Modelo tridimensional, em radianos	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	Justificativa	17
2	LIGAÇÕES	18
2.1	Componentes da ligação	18
2.1.1	Meios de ligação	18
2.2	Classificação das ligações	19
2.2.1	Classificação das ligações quanto à resistência	19
2.2.2	Classificação das ligações quanto à rigidez	19
2.3	Comportamento das ligações semirrígidas	21
2.4	Distribuição de esforços internos na estrutura	23
3	ANÁLISE DE LIGAÇÕES METÁLICAS	25
3.1	Cálculo do carregamento dos parafusos considerando efeito alavanca	25
3.2	Análise das ligações segundo o Eurocode 3	28
3.2.1	Ligações Soldadas	29
3.2.2	Ligações Parafusadas	32
3.2.2.1	Análise da região tracionada da ligação	38
3.2.2.2	Comprimento efetivo dos perfis “T” Equivalentes	42
3.2.2.3	Análise da região comprimida	43
3.2.2.4	Análise da região cisalhada	46
4	METODOLOGIA	47
4.1	Especificações do Modelo	47
4.1.1	Malha e condições de contorno	48
4.1.2	Descrição geométrica das ligações	50
4.2	Cálculo da Rigidez Rotacional	51
5	COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS	53
6	DISCUSSÃO	73
7	CONCLUSÃO	76

REFERÊNCIAS	78
Appendices	80
APÊNDICE A TABELAS RESUMO	81
APÊNDICE B GRÁFICOS DOS RESULTADOS	89
B.1 Ligações Feitas com pilares de 250 milímetros de altura	89
B.2 Ligações Feitas com pilares de 300 milímetros de altura	93
B.3 Ligações Feitas com pilares de 350 milímetros de altura	110
B.4 Ligações Feitas com pilares de 400 milímetros de altura	127
ANEXO A TABELAS-PERFIS "T" EQUIVALENTES	153

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente o comportamento das ligações estruturais são simplificadas para facilitar o cálculo da distribuição de esforços nas estruturas, considerando somente os extremos em relação à liberdade de rotação das mesmas (rótulas ou engastes), porém as ligações têm comportamento complexo e não linear, que geralmente fica em um patamar intermediário entre engastado e rotulado, chamado semirrígido. Atualmente a concepção de projetos estruturais demanda simulações estruturais mais refinadas e confiáveis. Considerando esses aspectos, o estudo do comportamento da ligação em relação à sua rigidez se mostra relevante tanto nos fatores econômico e ambiental, possibilitando a redução do consumo de aço na estrutura e consequente redução de custos, quanto tecnológico, fazendo uso de métodos computacionais mais avançados que reproduzam com maior fidelidade o comportamento da estrutura.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal analisar, com auxílio de elementos finitos, o comportamento de ligações metálicas parafusadas viga-pilar, considerando a não linearidade do material, o atrito entre as partes componentes da ligação e o efeito da concentração de tensões, para a determinação da rigidez rotacional da ligação e o comportamento individual de cada componente da ligação.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Simular o comportamento de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo não estendida utilizando o software Ansys, visando determinar o comportamento dos elementos da ligação e sua influência na rigidez rotacional da ligação.
- Variar as dimensões dos componentes da ligação: perfis da viga e pilar, diâmetro de parafusos, espessura da chapa de topo, e determinar a influência das dimensões de cada elemento na rigidez rotacional da ligação.
- Determinar o perfil de deformação dos elementos que influenciam a rigidez rotacional da ligação.

1.2 Justificativa

Atualmente o uso racional de materiais na construção civil é um importante fator a ser considerado ao se projetar e construir. O aço é um material com propriedades mecânicas que possibilitam a utilização de elementos estruturais com reduzida área de seção transversal, diminuindo o peso das estruturas e exigindo um cuidado maior no detalhamento estrutural, ressaltando-se a importância de se compreender a atuação das conexões na distribuição de esforços internos pela estrutura. Além dos elementos de ligação impactarem significativamente no custo da estrutura, eles influem no dimensionamento das vigas e pilares, pois a flexibilidade da conexão define como serão distribuídos os esforços nos elementos ligados, fazendo com que os esforços solicitantes sejam maiores ou menores, o que pode levar a necessidade da aplicação de perfis mais ou menos dispendiosos (KAMESHKI; SAKA, 2001).

A atual norma brasileira não aborda o cálculo da flexibilidade das ligações e para o cálculo usual, de forma simplificada, permite que as ligações sejam consideradas como sendo rígidas (não há movimento angular relativo entre os elementos) ou rotuladas (o movimento angular relativo entre os elementos é livre). Porém, como descrito por Wu Fu-hsiang; Chen (1990), o comportamento das ligações está num patamar intermediário entre o rígido e flexível, chamado semirrígido. Além disso a rigidez da ligação não é constante com o carregamento: ela decresce com o aumento do momento aplicado à ligação (como exemplificado na Figura 1), tornando mais complexos a análise da ligação e o dimensionamento da estrutura, se comparados com a análise tradicional das ligações.

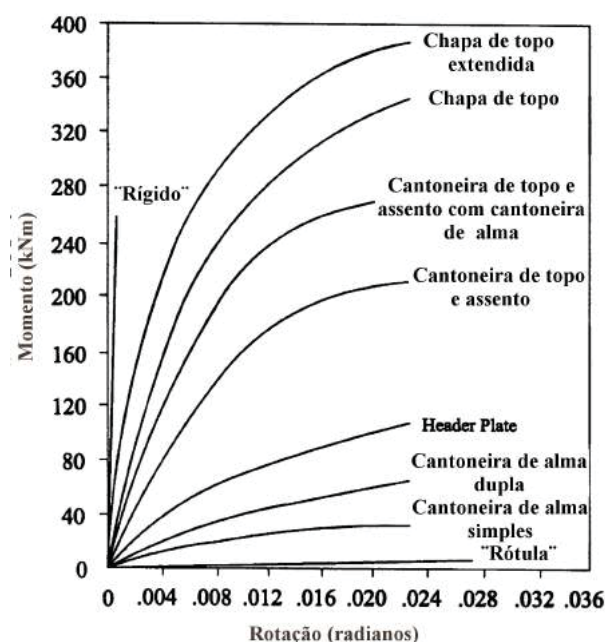


FIGURA 1 – Comportamento de ligações semirrígidas
 FONTE Kim e Choi (2001)

2 LIGAÇÕES METÁLICAS

As ligações são os pontos de transmissão de cargas (forças e momentos) entre os elementos que formam a estrutura. As conexões podem ter configurações que permitam ou restrinjam total ou parcialmente o giro relativo entre uma peça e outra. A partir desta configuração se definem as condições de apoio da peça estrutural, o que permite o cálculo da distribuição dos esforços internos solicitantes nas barras da estrutura e dos deslocamentos das barras.

O comportamento das ligações depende das características dos elementos que formam a ligação, como o diâmetro dos parafusos, as espessuras e altura dos perfis da viga e pilar, o tipo de ligação da viga no pilar (na mesa ou na alma) e presença de enrijecedores (RIBEIRO, 1998).

2.1 Componentes da ligação

As ligações são formadas por elementos de ligação e meios de ligação. Os elementos de ligação são todas as partes que auxiliam na transmissão das cargas: enrijecedores, chapas de ligação, placas de base, cantoneiras, consolos, talas de emenda e parte das peças ligadas envolvidas localmente na ligação. Os meios de ligação são as partes que unem as peças da estrutura: soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos (ABNT-NBR8800, 2008)

2.1.1 Meios de ligação

As ligações podem ser parafusadas ou soldadas. Dentre as parafusadas há dois tipos de conexões: ligação por contato e ligação por atrito. Na ligação por contato os parafusos podem ser solicitados a cisalhamento, tração ou tração e cisalhamento simultâneos. Este tipo de ligação pode ser feito com parafusos de alta resistência ou com parafusos comuns pois não haverá aplicação de uma força de protensão (tração) nos parafusos. A ligação por atrito, em estado limite de serviço, não transmite esforço cortante ao parafuso, pois este parafuso é protendido de forma a comprimir as chapas de ligação com a alma ou mesa dos perfis ligados, o que gera uma força de atrito entre as superfícies em contato e impede o contato do fuste do parafuso com a borda do furo, evitando que haja o cisalhamento do parafuso.

A ligação soldada se dá pelo aquecimento e fusão do aço das partes a serem ligadas e um metal derretido (metal da solda) que é adicionado à ligação.

A resistência de cálculo de soldas é determinada com base nos estados limites últimos de ruptura da solda na seção efetiva ou do metal base na face de fusão (SEGUI, 2013;

PFEIL WALTER; PFEIL, 2009).

As ligações soldadas podem ser do tipo solda de filete, solda de entalhe, solda de penetração total ou parcial e a solda de tampão. As mais comuns são as soldas de entalhe e as soldas de filete. As soldas de entalhe são aquelas onde o aço da solda é depositado em uma fenda ou sulco entre as partes a serem conectadas. Na solda de filete o aço da solda é disposto entre as duas partes dos elementos de metal base em contato (SEGUI, 2013).

2.2 Classificação das ligações

As ligações podem ser classificadas de duas formas: pela rigidez ou pela resistência. A seguir serão descritas estas classificações segundo o Eurocode-3 (2005) e a norma brasileira ABNT-NBR8800 (2008).

2.2.1 Classificação das ligações quanto à resistência

A classificação segundo a resistência divide as conexões em três categorias: ligações de resistência total, resistência parcial e rotuladas. As ligações de resistência total são caracterizadas pela ausência de rotação relativa e a transmissão total dos esforços entre os elementos de ligação. As ligações rotuladas têm comportamento oposto à de resistência total, tendo como característica principal a ausência de restrição ao movimento angular relativo entre os elementos ligados, o que acarreta na não transmissão de momentos fletores de um elemento ao outro. As ligações de resistência parcial têm comportamento intermediário entre as de resistência total e as rotuladas, transmitindo parte dos momentos fletores entre a viga e o pilar (MAGGY, 2004).

2.2.2 Classificação das ligações quanto à rigidez

A classificação segundo a rigidez divide o comportamento das ligações em engastado, semirrígido e rotulado.

A ABNT-NBR8800 (2008) define limites de rigidez para cada classificação em função da rigidez da ligação, da inércia da seção transversal e comprimento dos elementos analisados. Estes limites são descritos abaixo:

- Para que a ligação possa ser considerada rotulada, considera-se que o parâmetro $S_j \geq 0,5 \frac{EI_v}{L_v}$.
- O limite para que a ligação possa ser considerada rígida é definido pelas seguintes equações: $S_j \leq 25 \frac{EI_v}{L_v}$ e $\frac{k_v}{k_p} \geq 0,1$.
- Caso $\frac{k_v}{k_p} \leq 0,1$, a ligação deve ser considerada semirrígida.

Sendo:

$$k_v = \frac{I_v}{L_v} \text{ e } k_p = d \frac{I_p}{L_p};$$

S_j : Rigidez da ligação correspondente ao momento fletor de $d \frac{2}{3} M_{Rd}$;

E : Módulo de elasticidade do aço;

I_v : Momento de inércia da seção transversal da viga do topo do andar;

I_p : Momento de inércia da seção transversal do pilar;

L_v : Comprimento longitudinal da viga;

L_p : Comprimento longitudinal do pilar;

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

A ABNT-NBR8800 (2008) não apresenta um método de cálculo para o parâmetro S_j , porém cita o Eurocode-3 (2005) como referência para o cálculo do mesmo.

Ligação rotulada

A ligação rotulada é deformável, permite a rotação relativa entre as peças ligadas com nenhuma ou quase nenhuma restrição à rotação e deve transmitir os esforços internos sem gerar momentos fletores significativos que possam prejudicar o desempenho da estrutura (EUROCODE-3, 2005; PFEIL WALTER; PFEIL, 2009).

As conexões analisadas como rotuladas geram uma distribuição de momentos fletores internos caracterizada pela ausência de momentos nos apoios. Caso a configuração da ligação utilizada imponha restrição ao giro significativa, os resultados reais de solicitação de esforços e deformações podem variar de forma a comprometer o desempenho da estrutura ou levar a um dimensionamento que consuma mais material do que o necessário para suportar os esforços solicitantes reais.

Ligação engastada ou rígida

A ligação rígida é aquela que, ao ser solicitada, possui rigidez suficiente para garantir que não haja variação significativa do ângulo entre as barras ligadas (rotação relativa quase nula) até que o momento solicitante atinja o momento resistente máximo do elemento (PFEIL WALTER; PFEIL, 2009).

Este tipo de ligação transmite integralmente os momentos fletores entre uma peça e outra. Caso os elementos de ligação e meios de ligação não tenham rigidez suficiente para justificar a análise da estrutura como totalmente contínua (engastada), os valores dos esforços internos e nos apoios podem ter variação relevante, diminuindo a intensidade dos esforços de momento fletor nos apoios, aumentando o momento máximo positivo no vão e as deformações da estrutura (AVAKIAN, 2007).

Ligação semirrígida

A ligação semirrígida se caracteriza pelo comportamento intermediário entre a ligação rotulada e a ligação rígida, havendo uma interação entre os elementos que pode ser descrita pela curva momento-rotação da conexão (EUROCODE-3, 2005).

As ligações são modeladas como elementos de ligação rotacionais tendo curva característica momento-rotação definida com base na rigidez tangente e resistência da ligação.

2.3 Comportamento das ligações semirrígidas

Quando uma estrutura com conexões semirrígidas é solicitada por esforço de momento fletor, há uma movimentação angular θ_r , variável com a intensidade do momento fletor aplicado, entre as duas peças conectadas, como ilustrado na Figura .

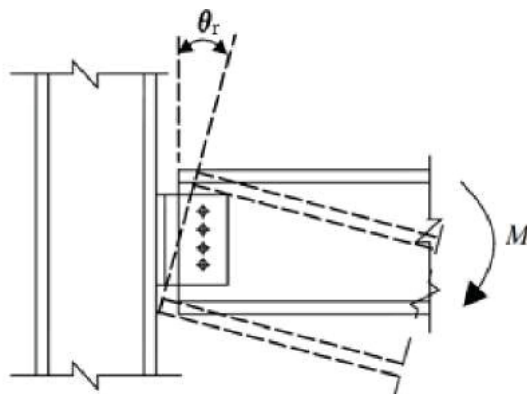


FIGURA 2 – Deformação rotacional de uma ligação
 FONTE Chen Wai-fah; Goto (1995)

O comportamento de ligações semirrígidas é descrito pela relação entre o momento fletor e a rotação relativa entre as peças ($M-\theta_r$). Este comportamento pode ser correlacionado ao comportamento de uma mola não linear macia, onde a rigidez tende a diminuir com o aumento do momento fletor aplicado e a curva que descreve a rigidez tem formato côncavo para baixo, como representado na Figura 3 (CALADO, 2011).

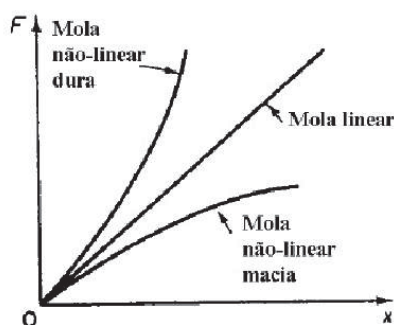


FIGURA 3 – Tipos de mola
FONTE Calado (2011)

Analisando as curvas $M-\theta_r$ para as diferentes configurações de ligação conclui-se que todas as ligações têm comportamento situado entre os extremos rotulado e engastado: a capacidade de transmissão de momentos fletores diminui com o aumento da flexibilidade da ligação e para o mesmo valor de momento a rotação relativa é maior em ligações com flexibilidade maior. Para uma mesma ligação, a rigidez diminui com o aumento da rotação e a curva $M-\theta_r$ apresenta comportamento não linear, diminuindo a rigidez à medida que a rotação relativa aumenta (AVAKIAN, 2007).

A Figura 4 mostra a representação da curva $M-\theta_r$ de alguns tipos de ligação.

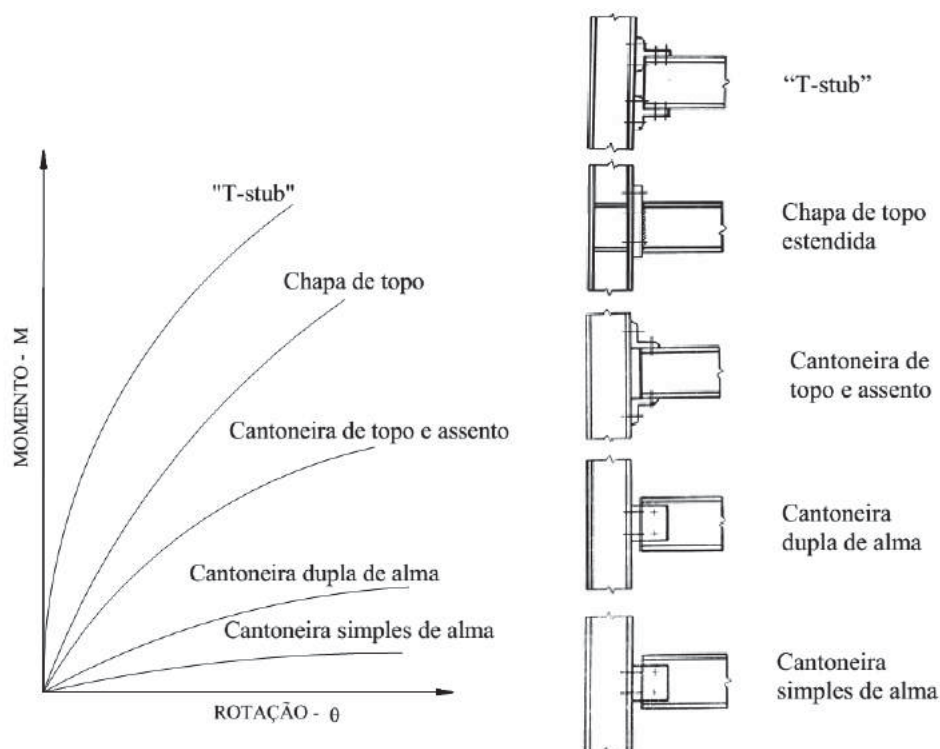


FIGURA 4 – Representação da curva momento-rotação relativa para diversos tipos de ligação
FONTE Avakian (2007)

A não linearidade da curva Momento-Rotação das ligações se dá devido a fatores como

a descontinuidade do material imposta pela conexão, o escoamento local de parte de algum componente, flambagem local das placas de ligação, entre outros (CHEN WAI-FAH; GOTO, 1995).

2.4 Distribuição de esforços internos na estrutura

As propriedades das ligações têm grande influência no desempenho da estrutura. A capacidade rotacional e a rigidez inicial da ligação podem ser usados como critério de classificação da ligação (KUKRETI; ZHOU, 2005).

Em vigas com apoios rotulados a distribuição interna de momentos se dá de forma que nos apoios o valor da solicitação seja zero (sem restrição à rotação relativa) e, ao longo da viga, vá sendo incrementado em função da distribuição do carregamento solicitante. Como nos apoios não há continuidade estrutural, não há transferência de momentos entre um elemento e outro. A figura 5 ilustra um pórtico com ligações rotuladas cuja viga está solicitada por um carregamento normal distribuído e o correspondente diagrama de momentos fletores.

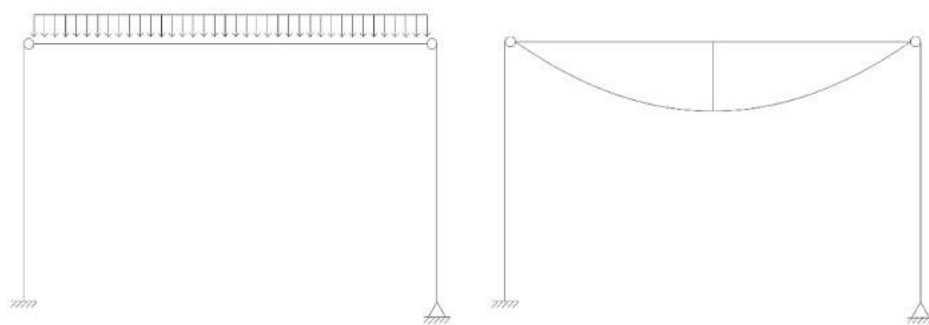


FIGURA 5 – Diagrama de momentos fletores para pórtico com ligações rotuladas
FONTE Avakian (2007)

As conexões rígidas, por serem muito restritivas ao giro relativo entre as peças a serem ligadas, conferem ao conjunto um comportamento de continuidade estrutural, gerando esforços nos apoios da viga e consequente transmissão integral dos esforços de momento fletor para os pilares, como ilustrado na Figura 6.

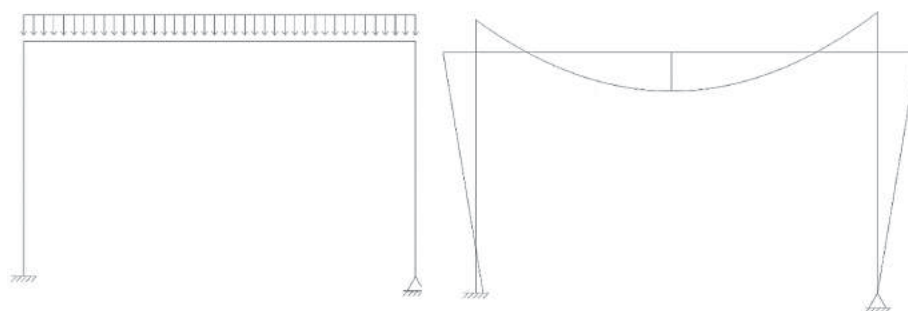


FIGURA 6 – Diagrama de momentos fletores para pórtico com ligações engastadas

FONTE Avakian (2007)

Ao se adotar simplificações para o cálculo estrutural (ligações rígidas ou rotuladas) em ligações que são semirrígidas, são ignorados muitos dos efeitos gerados pela semirrigidez da ligação. Nas ligações adotadas rígidas são desprezadas as reduções dos momentos fletores nos apoios, o aumento do momento positivo na viga, o aumento dos deslocamentos e o aumento do comprimento de flambagem dos pilares. Em ligações adotadas como flexíveis são ignorados os momentos gerados nos apoios, a diminuição do momento no centro da viga, a redução dos deslocamentos e a variação do comprimento de flambagem dos pilares. Os resultados podem diferir bastante caso ligações semirrígidas sejam consideradas rígidas ou flexíveis (SOUZA, 1999).

A representação das ligações semirrígidas se dá através de uma mola rotacional, como representado na Figura 7.

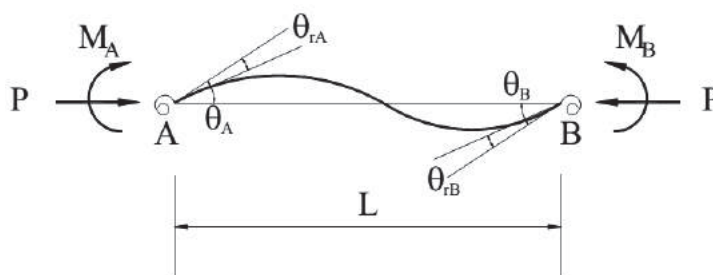


FIGURA 7 – Representação de uma barra com ligações semirrígidas

FONTE Souza (1999)

3 ANÁLISE DE LIGAÇÕES METÁLICAS

Para a maioria das ligações em estruturas aporticadas, a análise das ligações vigapilar é feita somente em relação à rotação relativa entre as peças, pois as deformações causadas pelos esforços normais e axiais não são relevantes quando comparados com os esforços rotacionais (AVAKIAN, 2007).

Para análise de estruturas aporticadas com ligações semirrígidas é preciso descrever a ligação através da curva momento-rotação relativa $M-\theta_r$. A rotação relativa é a variação do ângulo relativo entre as peças ligadas em função do momento fletor e é expressa em função do momento na ligação.

3.1 Cálculo do carregamento dos parafusos considerando efeito alavanca

Em geral o comportamento de ligações parafusadas com chapa de topo é controlado por dois estados limites, o escoamento da chapa de topo ou a ruptura dos parafusos. (DESSOUKI ABDELRAHIM KHALIL ; YOUSSEF, 2013) Os estados limites considerados para o dimensionamento de conexões metálicas com chapa de topo são a falha dos parafusos e o escoamento da chapa de topo (BORGSMILLER, 1995).

Srouji (1983) reportou uma extensa revisão bibliográfica sobre ligações com chapa de topo, analisando diversos métodos de análise para o cálculo da capacidade dos parafusos e da chapa de topo, concluindo que o método de Kennedy e o método "*yieldline*" podem ser usados para o dimensionamento dos parafusos e chapa de topo, respectivamente. Srouji (1984) fez testes em ligações com chapa de topo e concluiu que o método de Kennedy e o método "*yieldline*" têm acurácia na previsão da resistência da chapa de topo e esforços nos parafusos, *apud* (BORGSMILLER, 1995).

Hendrick D. Kulreti (1984), após realizar testes em oito ligações, fez algumas modificações no método de Kennedy. Hendrick D.; Kulreti (1985) analisou ligações com chapa de topo não estendida e relatou que o método modificado de Kennedy teve boa correlação com as informações obtidas nos ensaios realizados.

O método de Kennedy considera a analogia ao perfil T-Stub para o prever o carregamento nos parafusos considerando o efeito alavanca. O modelo consiste em um perfil T parafusado pela mesa a um suporte rígido; o carregamento é feito pela alma. No método assume-se que, com o acréscimo do carregamento, a chapa passa por três estados de comportamento, ilustrados na figura 8, (HENDRICK D.; KULRETI, 1985; BORGSMILLER, 1995).

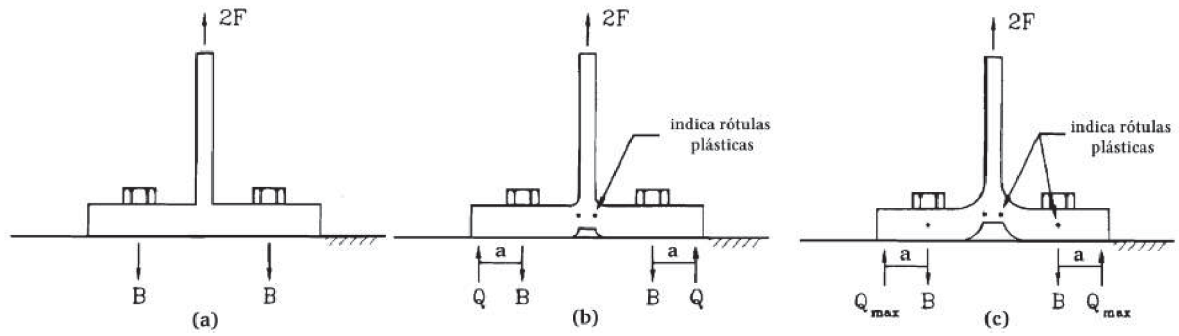


FIGURA 8 – Três estágios de comportamento da chapa de topo: (a) primeiro estágio/chapa espessa, (b) segundo estágio/chapa intermediária e (c) terceiro estágio/chapa fina

FONTE adaptado de Borgsmiller (1995)

Ao iniciar-se o carregamento a chapa de topo passa pelo primeiro estágio, chamado de estado de chapa espessa (*thick plate behavior*), onde não se formaram rótulas na chapa de topo e o efeito alavanca não se desenvolve (como ilustrado na Figura 8 (a)), pois o efeito alavanca se inicia quando a chapa de topo se deforma, fazendo com que haja contato entre as chapas (chapa de topo e mesa do pilar, por exemplo). O limite entre o primeiro e o segundo estágio é chamado limite para chapa espessa (*thick plate limit*) e é caracterizado pelo início da formação de rótulas na intersecção entre a mesa e a alma do perfil T (HENDRICK D.; KULRETI, 1985; BORGS MILLER, 1995).

No segundo estágio há o desenvolvimento de duas rótulas na intersecção entre a mesa e alma do perfil T, como ilustrado na Figura 8 (b), e o efeito alavanca está em um estágio intermediário entre zero e o valor máximo. O limite entre este e o terceiro estágio é chamado limite para placa fina (*thin plate limit*).

No terceiro estágio há o desenvolvimento de mais duas rótulas na linha dos parafusos e o efeito alavanca é máximo e constante, ilustrado na Figura 8 (c), (HENDRICK D.; KULRETI, 1985; BORGS MILLER, 1995). Ao se determinar o estágio de comportamento da chapa é possível determinar o carregamento do parafuso considerando o efeito alavanca.

Os valores limites de espessura entre as chapas finas (*thinplate*) e intermediárias, e intermediárias e espessas são obtidos por processos iterativos:

- limite para placa fina (HENDRICK D.; KULRETI, 1985):

– Equação de aproximação

$$t_{11} = \sqrt{\frac{2(F_p p_f - \pi d_b^3 F_{yb}/16)}{F_{py}(0,85b_f/2 + 0,8w')}} \quad (3.1)$$

– Equação iterativa refinada

$$t_{11} = \sqrt{\frac{2(F_p p_f - \pi d_b^3 F_{yb}/16)}{\frac{b_f}{2} \sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F_f}{b_f t_{11}}\right)^2} + w' \sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F_f}{2w' t_{11}}\right)^2}}} \quad (3.2)$$

Com a limitação $F_f < 2w' t_{11} F_{py} / \sqrt{3}$ (podem ocorrer valores negativos no denominador, indicando que a chapa está falhando por cisalhamento e a ligação é inadequada para o carregamento aplicado)

- limite de placa espessa, (HENDRICK D.; KULRETI, 1985):

– equação de aproximação

$$t_1 = \sqrt{4, 21 P_f F_f / (b_f F_{py})} \quad (3.3)$$

– equação iterativa refinada

$$t_1 = \sqrt{\frac{4p_f F_f}{B_f \sqrt{F_{py}^2 - 3(F_f / b_f t_1)^2}}} \quad (3.4)$$

As equações de Kennedy para o cálculo da carga devido ao efeito alavanca Q e o carregamento de cada parafuso B , no estágio intermediário são dadas pelas seguintes equações, (HENDRICK D.; KULRETI, 1985; BORGS MILLER, 1995):

- para chapa de topo não estendida com 2 parafusos tracionados:

$$Q = \frac{F p_f}{a} - \frac{b_f t_p^2}{8a} \sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{2F}{b_f t_p}\right)^2} - \frac{\pi d_b^3 F_{yb}}{32a} \quad (3.5)$$

$$B = 0,5 F_f + Q \quad (3.6)$$

- para chapa de topo não estendida com 4 parafusos tracionados:

$$Q = \frac{F_2(p_f + 0, 1p_b)}{a + p_b} - \frac{b_f t_p^2}{8(a + p_b)} \sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{2F_2}{b_f t_p}\right)^2} - \frac{\pi d_b^3 F_{yb}}{16(a + p_b)} \quad (3.7)$$

$$B_1 = F_f / 2, 5 + Q \quad (3.8)$$

O valor de a (local de ação de Q) foi modificado por Hendrick D.; Kulreti (1985). Este valor foi adaptado por uma função empírica de t_p e d_b ajustada a uma curva obtida experimentalmente:

$$a = 3,682 \left(\frac{t_p}{d_b}\right)^3 - 0,085 \quad (3.9)$$

A equação para o cálculo de Q_{max} e B para placa fina estão apresentadas a seguir.

$$Q_{max} = \frac{w't_p^2}{4a} \sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F'}{w't_p}\right)^2} \quad (3.10)$$

$$B = 0,5F_f + Q_{max}B_1 = 3F_f/8 + Q_{max} \quad (3.11)$$

Sendo:

- F' o menor entre os valores:

$$F' \leq \begin{cases} F_{limit} = \frac{t_p^2 F_{py}(0,425b_f + 0,8wt) + 0,125\pi d_b^3 F_y b}{4p_f} \\ F_{max} = 0,5(F_f)_{max} \end{cases} \quad (3.12)$$

- t_{11} : limite de espessura para placa intermediária;
- a : local de ação de Q ;
- t_p : espessura da chapa de topo;
- B_1 : carregamento de cada parafuso da linha exterior (ligação com 4 parafusos tracionados);
- B : carregamento de cada parafuso;
- B_2 : carregamento de cada parafuso da linha interior (ligação com 4 parafusos tracionados);
- w' : largura da chapa de topo na linha dos parafusos menos o diâmetro dos furos;
- F_{py} : escoamento da chapa de topo;
- F' : força da mesa (*flange force*) por parafuso;

Hendrick D.; Kulreti (1985), em função da modificação do valor de a , também modificaram os valores de carregamento dos parafusos da linha interna sugeridos anteriormente por Srouji (1983): B_2 foi modificado para $F_f/8$ para as chapas finas. Para as chapas espessas e intermediárias os valores sugeridos por Srouji (1984) se mostraram adequados aos obtidos experimentalmente e não foram modificados: $B_2 = 0$ para placas espessas e $B_2 = F_f/10$ para placas intermediárias.

3.2 Análise das ligações segundo o Eurocode 3

Segundo o anexo J do Eurocode-3 (2005) a ligação entre viga e pilar pode ser soldada ou parafusada, com ou sem auxílio de enrijecedores de alma no pilar. Para ligações parafusadas, a chapa de topo pode ser estendida ou de altura parcial, contendo somente dois parafusos por linha e em ligações com chapa estendida há somente uma linha de

parafusos acima da mesa da viga (EUROCODE-3, 2005).

Para a caracterização estrutural e mecânica das ligações é necessária a determinação do momento resistente, da rigidez rotacional e da capacidade de rotação da conexão, propriedades obtidas a partir da curva Momento-Rotação da ligação. Esta curva é obtida através da associação individual dos elementos da ligação e os esforços que atuam simultaneamente em cada um deles (BERGAMASCO,).

O método proposto pelo Eurocode-3 (2005) compreende a análise das regiões comprimida, tracionada e cisalhada da ligação, com objetivo de se obter o momento resistente. A capacidade de rotação e rigidez rotacional são definidas a partir dos resultados obtidos no cálculo do momento resistente da ligação.

O dimensionamento das ligações soldadas e parafusadas (com chapa de topo) pelo método apresentado no Eurocode-3 (2005) está apresentado a seguir.

3.2.1 Ligações Soldadas

Rigidez Rotacional e Capacidade Resistente

A rigidez rotacional de conexões soldadas é calculada pela equação abaixo:

$$S_j = \frac{E(h_b - t_{fb})^2 t_{wc}}{\sum \frac{1}{k_i} \left(\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right)^2} \quad (3.13)$$

sendo:

- k_i : fator de rigidez da componente i , apresentado na tabela 1;
- $F_{i,Rd}$: resistência devido ao momento solicitante em cada uma das componentes i da ligação;
- F_i : força devido ao momento solicitante em cada uma das componentes i da ligação;
- h_b : altura da viga;
- t_{fb} : espessura da mesa da viga;
- t_{wc} : espessura da alma do pilar.

TABELA 1 – Fator de rigidez k_i para ligações soldadas

Região	k_i
Alma do pilar na zona de cisalhamento	0,24
Alma do pilar na zona tracionada	0,8
Alma do pilar na zona comprimida	0,8
Elementos enrijecidos	∞

FONTE Barbosa (2006)

O Eurocode-3 (2005) considera a capacidade de rotação de ligações soldadas como sendo constante e independente da geometria da ligação, ou seja, a capacidade de rotação

é sempre $\theta_{cd}=0,015$ radianos (BARBOSA, 2006).

O cálculo da resistência das zonas comprimida, tracionada e cisalhada para ligações soldadas pelo método apresentado no Eurocode-3 (2005), anexo J, está apresentado a seguir.

Análise da região tracionada da ligação

O cálculo da resistência da região tracionada pelo método do Eurocode-3 (2005) depende do tipo de perfil utilizado (laminado ou soldado).

As equações para o cálculo da resistência da mesa tracionada estão apresentadas abaixo:

- Perfis laminados

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb}t_{fb}(t_{wc} + 2r_c) + 7f_{yc}t_{fc}^2}{\gamma_{M0}} \quad (3.14)$$

- Perfis soldados

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb}t_{fb}(t_{wc} + 2\sqrt{2}a_c) + 7f_{yc}t_{fc}^2}{\gamma_{M0}} \quad (3.15)$$

Para ambos os casos, se a condição apresentada pela equação 3.16 não for satisfeita, será necessário enrijecer a mesa do pilar.

$$F_{t,Rd} \geq \frac{0,7f_{yb}t_{fb}b_{fb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.16)$$

onde:

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

t_{fb} : espessura da mesa da viga;

t_{wc} : espessura da alma do pilar;

r_c : raio de concordância do perfil laminado do pilar;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço do pilar;

t_{fc} : espessura da mesa do pilar;

a_c : garganta de solda da união entre mesas e alma do pilar para perfis soldados;

b_{fb} : largura da mesa da viga;

γ_{M0} : coeficiente de ponderação igual a 1, 10.

A resistência da alma do pilar é calculada segundo a equação 3.17. A largura efetiva b_{eff} é o comprimento relativo da região afetada pela força que atua na mesa, representado pela dispersão das tensões na alma da viga (proporção 1 : 1) e na coluna (proporção 1 : 2,5), como exemplificado na Figura 9, com valores diferentes para perfis laminados e soldados. O cálculo da largura efetiva é dado pelas equações 3.18 e 3.19.

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc}t_{wc}b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.17)$$

- Perfis laminados

$$b_{eff} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_c + 5(t_{fc} + r_c) \quad (3.18)$$

- perfis soldados

$$b_{eff} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_c + 5(t_{fc} + \sqrt{2}a_c) \quad (3.19)$$

sendo:

a_c : garganta de solda da união entre mesas e alma da viga para perfis soldados.

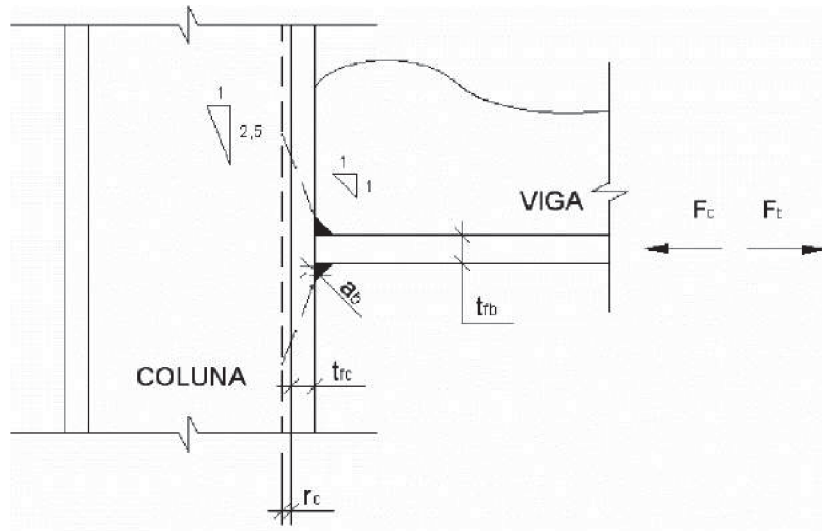


FIGURA 9 – Largura efetiva da região afetada pela força atuante no pilar, b_{eff}
FONTE Barbosa (2006)

Análise da região comprimida

A resistência da região comprimida é definida pela análise da alma do pilar, calculada segundo a equação 3.20:

$$F_{c,Rd} = \frac{f_{yc} t_{wc} \left(\frac{1,25 - 0,5\gamma_{M0}\tau_{n,Edc}}{f_{yc}} \right) b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.20)$$

sendo $\tau_{n,Edc}$ a tensão de escoamento do aço da viga

Análise da região cisalhada da ligação

O cálculo da resistência ao cisalhamento da alma de uma coluna sem enrijecedores é dado pela equação 3.21.

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_{yc} \left(\frac{A_v}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (3.21)$$

com A_v : área cisalhada da alma do pilar, dada pelas equações:

- Perfis laminados

$$A_v = 1,04ht_w \quad (3.22)$$

- Perfis soldados

$$A_v = \sum dt(t_w) \quad (3.23)$$

sendo:

h : altura da alma;

t_w : espessura da alma;

d : largura da alma, como indicado na Figura 10.

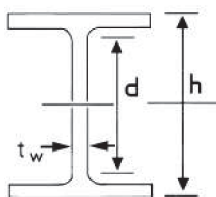


FIGURA 10 – Dimensões t_w , h e d
 FONTE adaptado de Eurocode-3 (2005)

Caso haja necessidade de enrijecedores para cisalhamento, estes devem ser dispostos diagonalmente e dimensionados aos esforços de tração e compressão transmitidos pela viga (BARBOSA, 2006).

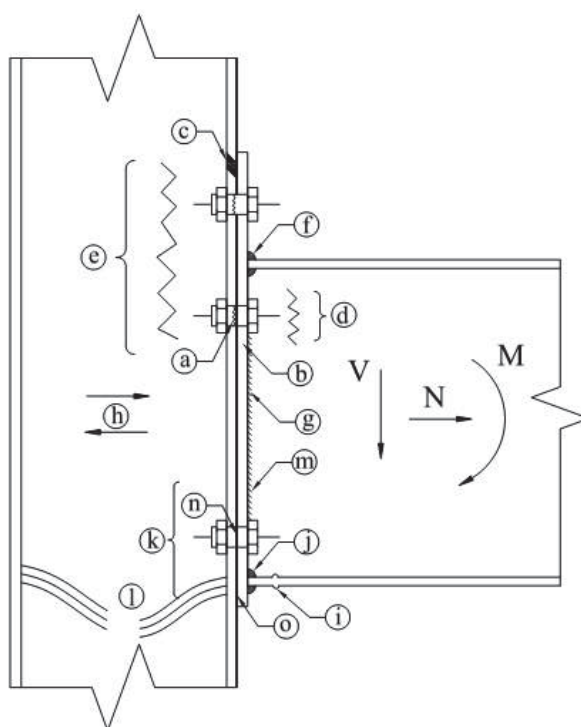
3.2.2 Ligações Parafusadas

De forma semelhante às ligações soldadas, o cálculo da rigidez das ligações parafusadas pelo método do Eurocode-3 (2005) é feito em função da análise das regiões de tração, compressão e cisalhamento, ilustradas na Figura 11.

TABELA 2 – Verificações de resistência nos elementos da ligação

Região	Referência Figura 17	Verificação
Tracionada	a	Tração nos parafusos
	b	Flexão da chapa de topo
	c	Flexão da mesa do pilar
	d	Tração na alma da viga
	e	Tração na alma do pilar
	f	Solda mesa/chapa de topo
	g	Solda alma/chapa de topo
Cisalhamento Horizontal	h	Cisalhamento no painel de alma do pilar
Comprimida	i	Mesa da viga
	j	Solda mesa/chapa de topo
	k	Enrugamento da alma do pilar
	l	Flambagem da alma do pilar
Cisalhamento Vertical	m	Solda alma/chapa de topo
	n	Cisalhamento nos parafusos
	o	Pressão de contato (mesa ou chapa)

FONTE adaptado de Ribeiro (1998)

FIGURA 11 – Regiões para verificação da resistência para ligação viga-coluna com chapa de topo
FONTE adaptado de Ribeiro (1998)

Rigidez Rotacional e Capacidade de rotação da ligação

O anexo J do Eurocode-3 (2005) apresenta a equação 3.24 para o cálculo da rigidez rotacional de ligações parafusadas:

$$S_j = \frac{Eh_i^2 t_{wc}}{\sum \frac{\mu_i}{k_i} \left(\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right)} \quad (3.24)$$

onde:

h_i : distância da primeira linha de parafusos abaixo da mesa tracionada da viga até o centro de resistência da zona comprimida (linha média da mesa inferior da viga);

k_i : fator de rigidez da componente i , apresentado na Tabela 3;

$F_{i,Rd}$: resistência devido ao momento solicitante em cada uma das componentes i da ligação;

F_i : força devido ao momento solicitante em cada uma das componentes i da ligação;

t_{wc} : espessura da alma do pilar;

μ_i : Fator de modificação, com valores indicados na Tabela 3.

TABELA 3 – Fatores k_i e μ_i

Componente i	k_i	μ_i
1. Zona de corte alma do pilar	0,24	1
2. Zona tracionada alma do pilar	0,8	1
3. Zona comprimida alma do pilar	0,8	1
4. Zona tracionada mesa do pilar	(Eq. 3.25)	(Eq.3.28)
5. Zona tracionada parafusos	(Eq. 3.26)	
6. Zona tracionada chapa de extremidade	(Eq. 3.27)	

FONTE adaptado de Eurocode-3 (2005)

$$k_4 = \frac{t_{fc}^3}{4m^2 t_{wc}} \quad (3.25)$$

$$k_5 = \frac{A_s}{l_b t_{wc}} \quad (3.26)$$

$$k_6 = \frac{t_{ch}^3}{12\lambda_2 m^2 t_{wc}} \quad (3.27)$$

$$\mu_i = \frac{h_i F_{i,Rd}}{M_{Rd}} \quad (3.28)$$

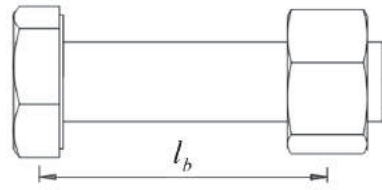


FIGURA 12 – Comprimento total de aperto

Onde:

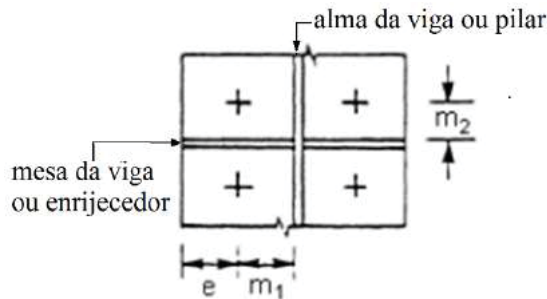
A_s : Área da seção transversal do parafuso;

l_b : comprimento total do aperto (espessura da mesa do pilar, mais espessura da chapa de topo, mais metade da espessura da cabeça do parafuso e porca), como indicado na Figura 12;

t_{ch} : espessura da chapa de extremidade;

$\lambda_2: \frac{m_2}{m_1 + e}$;

m_1 , m_2 e e como indicado na Figura 13.

FIGURA 13 – Distâncias m_1 , m_2 , e e

FONTE adaptado de Eurocode-3 (2005)

A capacidade de rotação de ligações parafusadas φ_{Cd} é dependente da região que controla o momento resistente (região tracionada, comprimida ou de corte) e é obtida pela equação 3.29:

$$\varphi_{Cd} = \frac{10,6 - 4\beta_{cr}}{1,3h_1} \quad (3.29)$$

Onde:

h_1 : distância da primeira linha de parafuso abaixo da mesa tracionada da viga até o centro de resistência da zona comprimida (linha média da mesa inferior da viga);

β_{cr} : valor de β (definido a seguir) para a componente com o menor valor de $\frac{F_{t,Rd}}{\sum(B_{t,Rd})}$;

$B_{t,Rd}$: menor valor entre $F_{t,Rd}$ e $B_{p,Rd}$, sendo: $B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$

$F_{t,Rd}$: resistência de tração de cálculo de um parafuso dada por: $F_{t,Rd} = \frac{0,9F_{ub}A_b}{\gamma_{Mb}}$

Sendo:

d_m : menor dos valores entre diâmetro da cabeça do parafuso e porca;

t_p : espessura da chapa embaixo da cabeça do parafuso ou porca;

F_{ub} : resistência última à tração do parafuso;

γ_{Mb} : 1,25;

A_b : área da seção transversal do parafuso.

Caso o momento resistente seja determinado pela resistência da região tracionada, há de se considerar o tipo de ruptura do perfil “T” equivalente (descrito na Figura 19), e cada linha de parafusos deve satisfazer os critérios :

- Modo 1 de ruptura (escoamento total da mesa do pilar ou chapa de topo):

$$\beta \leq \frac{\lambda}{1 + 2\lambda} \quad (3.30)$$

- Modo 2 de ruptura (ruptura do parafuso com escoamento da mesa do pilar ou chapa de topo):

$$\frac{2\lambda}{1 + 2\lambda} < \beta < 2 \quad (3.31)$$

Onde os parâmetros β e λ serão definidos nas equações (3.33) e (3.34).

Momento Resistente

O momento resiste em ligações parafusadas é calculado em função da menor resistência obtida nas análises das zonas tracionada e comprimida da ligação, multiplicada pela distância entre os centros destas zonas. A rigidez rotacional e a capacidade de rotação da ligação devem ser definidas de acordo com as características da zona que governa o cálculo do momento resistente (BARBOSA, 2006).

O Eurocode-3 (2005) tem como princípio básico de dimensionamento a divisão da ligação em componentes. Esses componentes são verificados de acordo com o esforço a que estão submetidos, esforços os quais são definidos a partir da região onde se encontra o componente na ligação, como apresentados na Tabela 2 e Figura 11 (MAGGY, 2000; RIBEIRO, 1998).

O Eurocode-3 (2005) apresenta algumas definições para caracterização das ligações: um “nó” é um conjunto de elementos que proporciona a conexão de elementos estruturais, possibilitando a transmissão dos esforços internos. Os componentes básicos do nó são as partes que contribuem para uma ou mais propriedades estruturais (resistência aos esforços internos, rigidez rotacional e capacidade de rotação) (EUROCODE-3, 2005).

O método de análise descrito no Eurocode-3 (2005) assume que a distribuição de forças na ligação é dada em função da geometria da mesma. A transmissão do momento fletor é feita por um binário cujo braço de alavanca é a distância entre o centro de compressão e o centro dos elementos (parafusos ou solda) que estão sendo tracionados, como exemplificado na Figura 14.

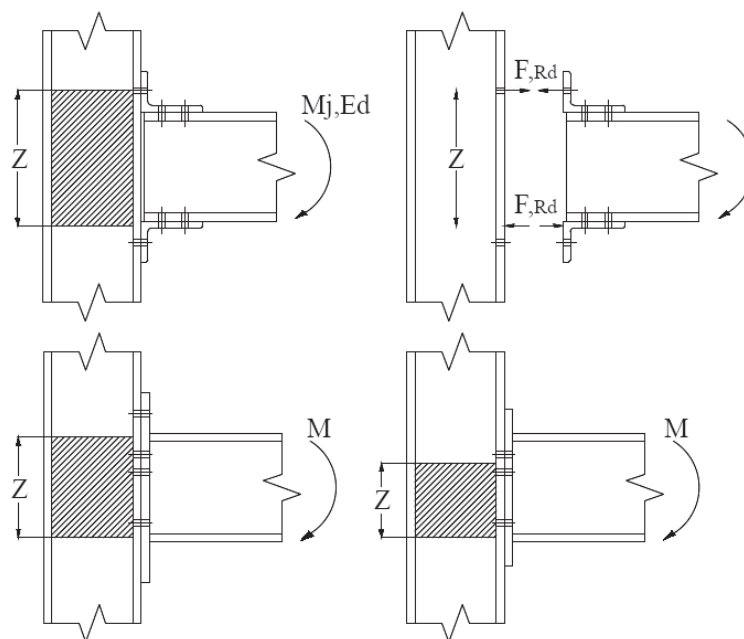


FIGURA 14 – Braço de alavanca do binário tração/compressão
FONTE Romano (2001)

Este método também considera a distribuição plástica das forças de tração nos parafusos e presume que a força de resistência total de cada linha de parafusos é correspondente a capacidade resistente dos elementos que estão atuando na região desta linha, o que gera uma distribuição de forças diferente da tradicional triangular dada em função do braço de alavanca: a solicitação é maior nos parafusos próximos a locais enrijecidos (mesa da viga e enrijecedores, por exemplo), como ilustrado na Figura 15 (MAGGY, 2000; RIBEIRO, 1998).

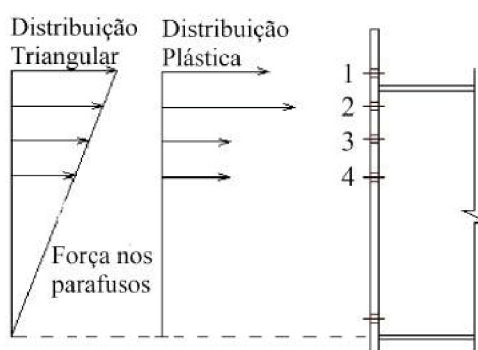


FIGURA 15 – Distribuição das forças nas linhas dos parafusos
FONTE Maggy (2004)

Para que a distribuição plástica das forças entre as linhas de parafusos seja válida, ou seja, para que as linhas de parafusos possam desenvolver sua capacidade resistente total, é necessário que a ligação seja capaz de se deformar. Para verificação da validade da distribuição plástica é considerada a seguinte condição:

$$t < \frac{d_b}{1,9} \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}} \quad (3.32)$$

Onde:

t : espessura da chapa de topo ou mesa do pilar;

d_b : diâmetro do parafuso;

f_{ub} : resistência última à tração do parafuso;

f_y : limite de escoamento da chapa de topo ou mesa do pilar.

A verificação deve ser feita para o lado do pilar e para o lado da viga. Caso estas condições não sejam satisfeitas, as forças de tração nas linhas de parafuso devem ser limitadas às correspondentes obtidas na distribuição triangular elástica, englobando os parafusos abaixo da mesa tracionada da viga, como exemplificado na Figura 16.

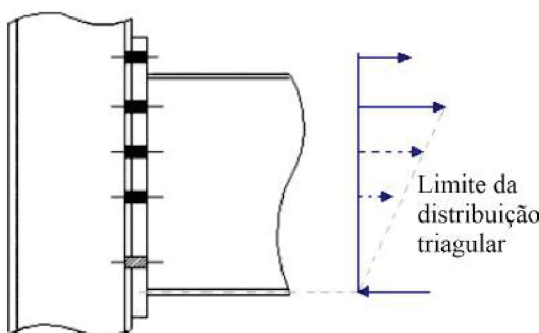


FIGURA 16 – Limite de distribuição triangular de forças nos parafusos
FONTE Maggy (2000)

3.2.2.1 Análise da região tracionada da ligação

Como o método inclui a verificação de todos os elementos da conexão, será necessário checar isoladamente para cada linha de parafusos, a resistência dos parafusos, da chapa de topo, da mesa do pilar e das almas da viga e do pilar. A resistência final será a capacidade máxima do elemento de menor resistência, e a solicitação excedente será transferida para a próxima linha com reserva de capacidade resistente (RIBEIRO, 1998).

A cada etapa de verificação são considerados apenas os parafusos acima da linha de parafusos analisada, de forma que cada linha é analisada isoladamente e em um grupo formado pela linha atual e as já analisadas. Assim, a resistência da segunda linha será o menor valor entre a análise isolada da linha de parafusos e capacidade obtida na análise do grupo formado pela segunda e primeira linhas, menos a resistência obtida para a primeira

linha.

Os enrijecedores tracionados (ou mesa da viga) funcionam como separações entre as linhas de parafuso, de modo que as linhas inferiores a este elemento não devem ser combinadas com as linhas superiores, como pode ser observado na Figura 17, onde as linhas 1 e 2 são analisadas em grupo no lado do pilar, e no lado da viga (onde a mesa da viga “divide” as linhas de parafuso) são analisadas isoladamente (MAGGY, 2000; RIBEIRO, 1998).

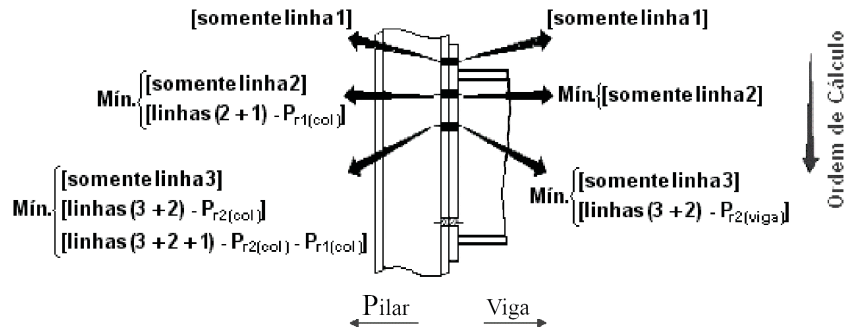


FIGURA 17 – Etapas da verificação da capacidade resistente nas linhas de parafusos

FONT E Maggy (2000)

Para a avaliação da flexão na chapa de topo e na mesa do pilar o método do Eurocode 3 considera esses elementos como perfis T equivalentes, analisados em linhas isoladas ou em grupo, como demonstrado na Figura 18. As verificações são feitas em relação a este perfil T e a resistência é dada pelo menor valor entre os três obtidos na análise dos modos de ruptura representados na Figura 19.

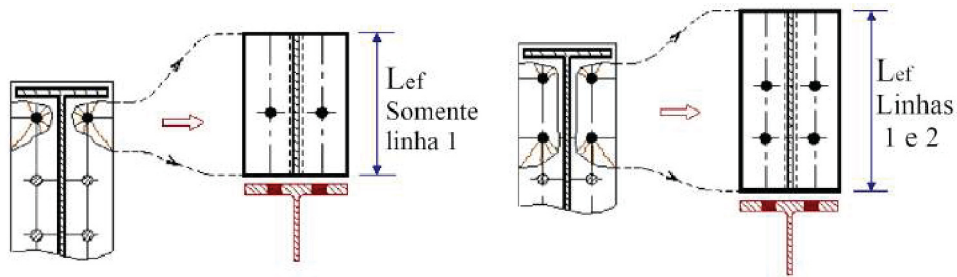


FIGURA 18 – Perfis T equivalentes

FONT E Maggy (2000)

A flexão da mesa do perfil T equivalente gera uma força de alavanca, adicional à força de tração transmitida pela viga, que na Figura 18 está representada pela letra Q. O cálculo das solicitações nos parafusos desta área deve considerar a ação de ambas as solicitações.

O modo de falha do perfil T equivalente é definido através da Figura 20, onde os parâmetros β e λ são definidos pelas equações:

$$\lambda = \frac{n}{m} \quad (3.33)$$

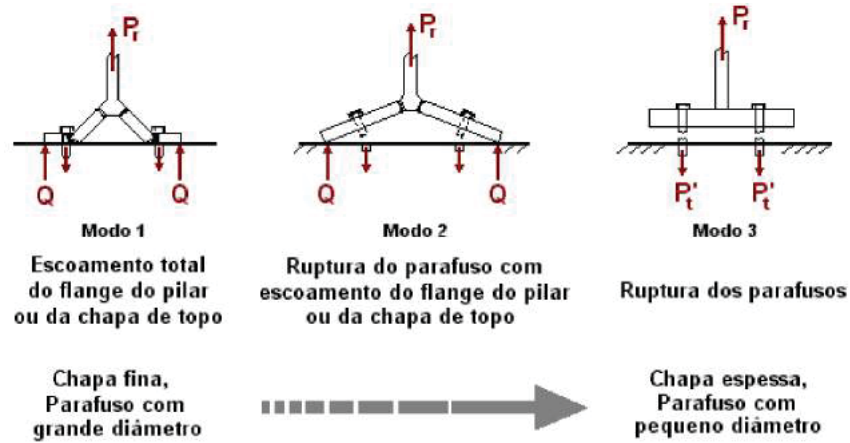


FIGURA 19 – Possíveis modos de falha do perfil T equivalente

FONTE Maggy (2000)

$$\beta = \frac{4M_p}{m \sum (B_{t,Rd})} \quad (3.34)$$

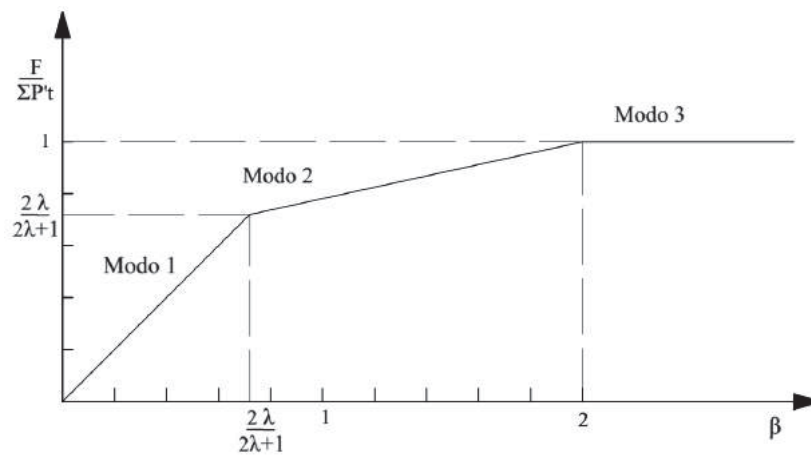


FIGURA 20 – Relação dos modos de ruptura com a geometria da ligação

FONTE Eurocode-3 (2005)

A resistência à flexão da mesa do pilar ou da chapa de topo é calculada em função da força de tração atuante em uma linha ou um grupo de linhas de parafusos, analisados segundo os modos de ruptura. A resistência será dada pelo menor valor obtido, através das equações abaixo:

- Modo 1: Escoamento total da mesa do pilar ou da chapa de topo:

$$P_r = \frac{4M_{pl}}{m} \quad (3.35)$$

- Modo 2: Ruptura do parafuso com escoamento da mesa do pilar ou chapa de topo:

$$P_r = \frac{2M_{pl} + n \sum (B_{t,Rd})}{m + n} \quad (3.36)$$

- Modo 3: Ruptura dos parafusos

$$P_r = \sum (B_{t,Rd}) \quad (3.37)$$

Onde:

P_r : capacidade resistente da linha ou grupo de linhas de parafusos;

M_{pl} : momento de plastificação total do perfil “T” equivalente, representando a mesa do pilar ou a chapa de topo, com:

$$M_{pl} = 0,25L_{ef}t^2f_y \quad (3.38)$$

L_{ef} : comprimento efetivo da linha de escoamento no perfil “T” equivalente, apresentado em forma de tabelas (apresentadas a seguir), de acordo com a posição das linhas ou grupos de linhas de parafusos e da presença ou não de enrijecedores ou da mesa da viga;

t : espessura da mesa do pilar ou da chapa de topo;

f_y : limite de escoamento da mesa do pilar ou da chapa de topo;

$B_{t,Rd}$: limite superior de resistência do parafuso quando o efeito de alavanca é considerado;

$\sum(B_{t,Rd})$: somatório dos limites superiores de resistência de todos os parafusos de um grupo;

m : distância do centro do parafuso à face da alma do pilar ou da viga, menos 80% do raio mesa/alma (pilar) ou da dimensão da solda da alma/chapa de topo (viga);

n : distância efetiva do centro do parafuso à borda da mesa do pilar ou da chapa de topo, no máximo igual a $1,25m$.

Para o trecho da chapa de topo situada além da mesa tracionada, são necessárias as dimensões apresentadas na Figura 21. Sendo:

m_x : distância do centro do parafuso à face da mesa da viga, menos 80% da dimensão da solda da chapa de topo/ mesa da viga;

e_x : distância do centro do parafuso à extremidade da chapa de topo;

n_x : menor valor entre e_x e $1,25m_x$;

g : distância horizontal entre os centros dos parafusos;

x : distância entre o centro do furo e a face da mesa da viga;

b_{ch} : largura da chapa de topo;

b_{fc} : largura da mesa do pilar;

$t_{w,v}$: espessura da alma da viga;

$t_{w,p}$: espessura da alma do pilar;

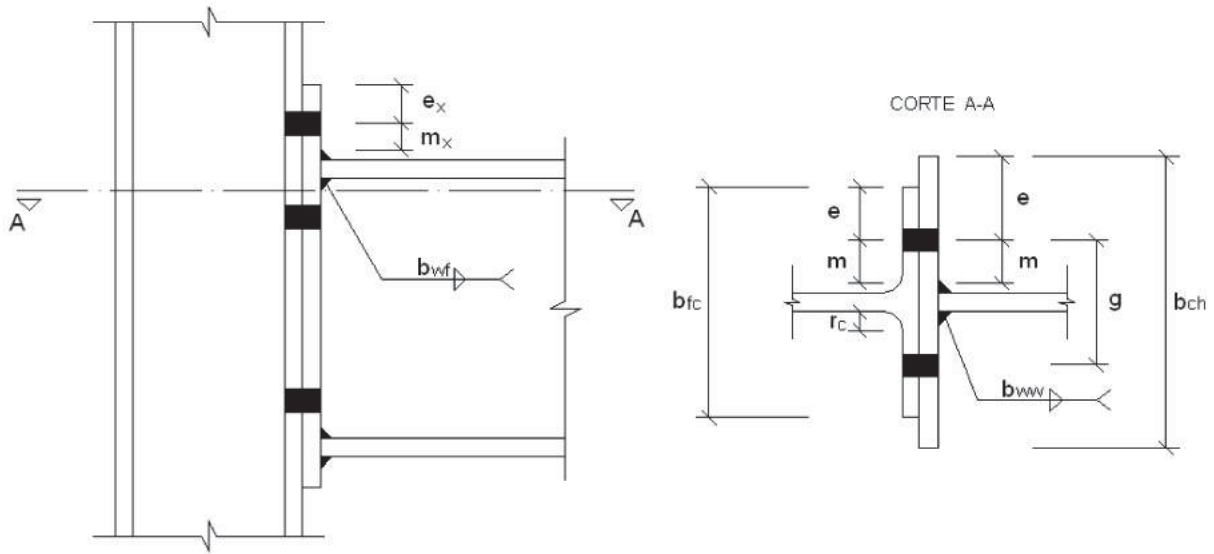


FIGURA 21 – Geometria da ligação

FONTE Barbosa (2006)

$b_{w,w}$: perna da solda de filete entre a chapa e a alma da viga;

$b_{w,f}$: perna da solda de filete entre a chapa e mesa da viga.

A verificação da resistência à tração da alma da viga e do pilar é feita em relação a uma linha de parafusos ou grupo de linhas, através da seguinte equação 3.39.

$$P_r = L_t t_w f_y \quad (3.39)$$

Onde:

L_t : comprimento efetivo da alma (da viga ou do pilar) à tração, admitindo-se um espraçamento máximo de 60° dos parafusos em relação ao plano médio da alma;

t_w : espessura da alma da viga ou do pilar;

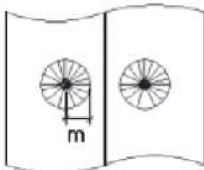
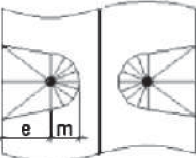
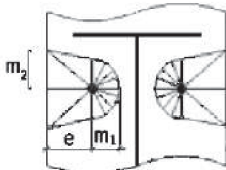
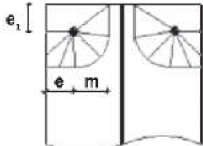
f_y : limite de escoamento do material da alma da viga ou do pilar.

3.2.2.2 Comprimento efetivo dos perfis “T” Equivalentes

Para que seja possível aplicar a teoria de ligações T-stub na análise das ligações é necessário definir um comprimento efetivo para cada perfil T equivalente da ligação, dado em função das configurações das charneiras plásticas que se formam na região dos parafusos (ROMANO, 2001).

O BCSA/SCI, 1996 (*British Constructional Steelwork Association/Steel Construction Association*) citado por Romano (2001) apresenta algumas tabelas para o cálculo do comprimento efetivo de linhas de parafusos locadas na mesa do pilar ou chapa de topo (em anexo A). A tabela 4 é um exemplo. O valor do parâmetro α é obtido da Figura 22

TABELA 4 – Comprimento equivalente para linhas de parafusos atuando isoladas

Linha de parafusos separados por alma na mesa do pilar ou chapa de topo	
	<p>Modelo i <i>Escoamento circular</i></p> $L_i = 2\pi \cdot m$
	<p>Modelo ii <i>Escoamento lateral</i></p> $L_{ii} = 4m + 1,25e$
	<p>Modelo iii <i>Escoamento lateral próximo à mesa da viga ou enrijecedor</i></p> $L_{iii} = \alpha \cdot m_1$
	<p>Modelo iv <i>Escoamento de bordo</i></p> $L_{iv} = 2m + 0,625e + e_x$

FONTE: BCSA/SCI, 1996, adaptado de Romano (2001)

3.2.2.3 Análise da região comprimida

A análise da região comprimida da ligação compreende a verificação do esmagamento e flambagem local da alma do pilar e o esmagamento da mesa da viga.

Para as verificações do esmagamento da alma, como no caso de ligações soldadas, é considerado que a largura da região de influência da compressão da viga se propaga com espraçamento de 45° na espessura da chapa de topo e de 1 : 2,5 através da mesa do pilar e do raio de concordância entre mesa e alma do pilar (estas considerações estão ilustradas na Figura 9). Na análise da flambagem, considera-se o espraçamento de 45° até o eixo do pilar (MAGGY, 2000; RIBEIRO, 1998).

A capacidade resistente da zona comprimida é dada pelo elemento menos resistente dentre os estados limites últimos de esmagamento da mesa da viga, flambagem local da alma do pilar e esmagamento da alma do pilar (ROMANO, 2001).

A capacidade resistente da mesa da viga, desconsiderando a contribuição de parte da alma e de possíveis acréscimos de resistência devido ao encruamento do material, é dada por (ROMANO, 2001):

$$P_{c,fv} = 1,2\varphi t_{fv} b_{fv} f_y \quad (3.40)$$

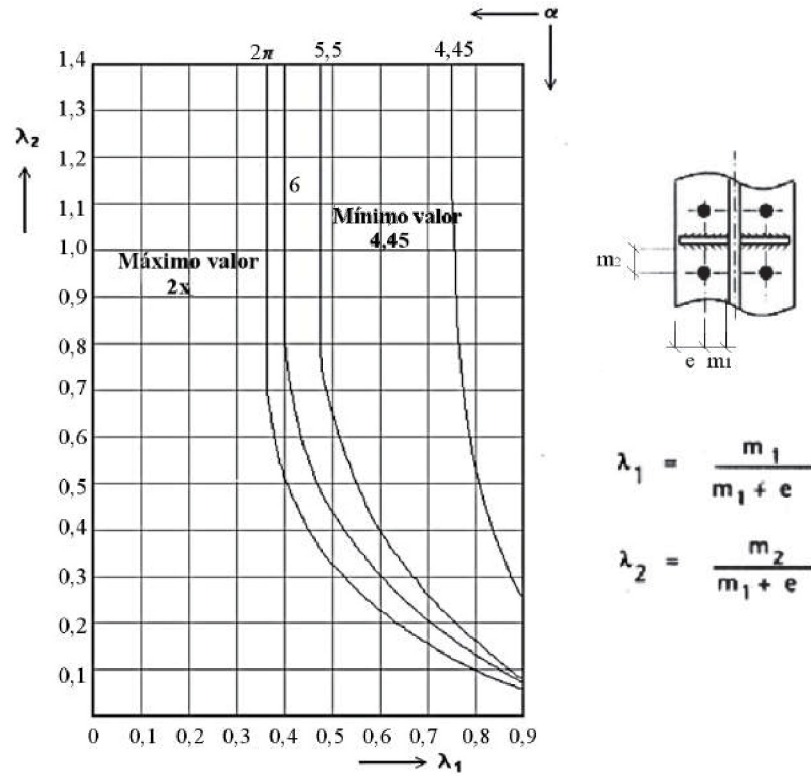


FIGURA 22 – Valores de α para linha de parafusos na região enrijecida
FONTE Eurocode-3 (2005)

Onde:

t_{fv} : espessura da mesa da viga;

b_{fv} : largura da mesa da viga;

φ : 0,9;

f_y : tensão de escoamento do aço.

A resistência ao esmagamento da alma do pilar é calculada como descrito a seguir:

$$P_{c,wc} = \varphi t_{wc} b_{wc} f_y \quad (3.41)$$

$$b_{wc} = b_1 + n_1 \quad (3.42)$$

$$b_1 = t_{fv} + 2s_{wf} + 2t_{ch} \quad (3.43)$$

$$n_1 = 2,5(2s_{wc} + 2t_{fc}) \quad (3.44)$$

A dispersão das tensões na alma do pilar e as b_1 e n_1 estão ilustradas na figura 23.

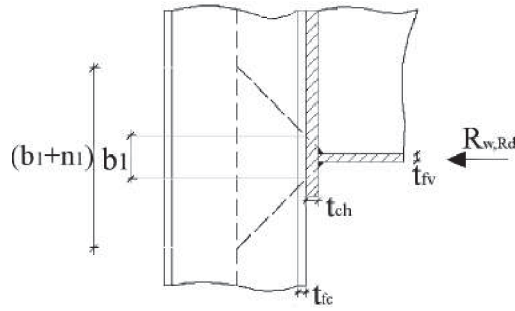


FIGURA 23 – Dispersão das tensões para a verificação do esmagamento na alma do pilar
FONTE Romano (2001)

Onde:

t_{fv} : espessura da mesa da viga;

t_{ch} : espessura da chapa de topo;

s_{wf} : espessura da solda entre a mesa da viga e a chapa de topo;

s_{wc} : espessura da solda de composição do pilar se este for perfil soldado ou o raio de concordância entre mesa e alma se este for perfil laminado;

t_{fc} : espessura da mesa do pilar;

t_{wc} : espessura da alma do pilar;

φ : 0,9.

A resistência da alma do pilar à flambagem local é pela por:

$$P_{fl,wc} = \varphi \rho_{wc} t_{wc} b_{wc} f_y \quad (3.45)$$

Sendo ρ_{wc} o coeficiente de flambagem dado em função da esbeltez do painel de alma do pilar, dado por:

$$\lambda_{wc} = 0,932 \sqrt{\frac{b_{wc} d_{wc} f_y}{E t_{wc}^2}} \quad (3.46)$$

$$\lambda_{wc} \leq 0,673 \rightarrow \rho_{wc} = 1,0 \quad (3.47)$$

$$\lambda_{wc} \geq 0,673 \rightarrow \rho_{wc} = \frac{1,0}{\lambda_{wc}} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{wc}}\right) \quad (3.48)$$

Onde:

d_{wc} : altura livre da alma entre as mesas, $d_{wc} = h_c - 2t_{fc} - 2s_{wc}$;

h_c : altura da seção transversal do pilar;

E : módulo de elasticidade longitudinal do aço.

3.2.2.4 Análise da região cisalhada

A transmissão do cisalhamento em uma ligação viga-pilar com chapa de topo, segundo o *European Community of Steel Construction* – ECSC, citado por Romano (2001) é feita inteiramente pelos parafusos e pela solda entre a viga e chapa de topo.

O Eurocode-3 (2005) limita a resistência ao cisalhamento dos parafusos solicitados à tração a 30% da resistência total, resultando na equação abaixo:

$$V \geq n_s P_{ss} + n_t P_{tss} \quad (3.49)$$

Onde:

V : esforço cortante na ligação;

n_s : número de parafusos fora da região tracionada;

n_t : número de parafusos na região tracionada;

P_{ss} : capacidade resistente ao cisalhamento, de um parafuso, tomando-se o menor dos valores calculados para cisalhamento puro no parafuso e para pressão de contato na chapa de topo e na mesa do pilar;

P_{tss} : capacidade resistente ao cisalhamento, de um parafuso, tomando-se o menor entre os valores correspondentes a 30% da resistência ao cisalhamento puro no parafuso e a resistência à pressão de contato na chapa de topo e na mesa do pilar.

A resistência ao cisalhamento do painel de alma do pilar é dada pela equação:

$$P_v = 0,6\varphi t_{wc}(h_c - 2t_{fc})f_y \quad (3.50)$$

4 METODOLOGIA

Foram analisadas ligações metálicas parafusadas viga pilar com chapa de topo não estendida, com quatro parafusos de ligação. A simulação tridimensional foi feita no *software* Ansys Workbench 17. A rigidez rotacional das ligações foi calculada pelo método proposto pelo Eurocode-3 (2005) (os cálculos foram apresentados por Zanoni (2015)) e pela rotação apresentada na simulação tridimensional.

4.1 Especificações do Modelo

Foram simuladas, via Método dos Elementos Finitos (MEF), 35 ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo não estendida, com quatro parafusos de ligação. A geometria das ligações foi feita com auxílio do *software* Salome (versão 8.3.0), onde foram escritos *scripts* de comando em linguagem de programação *python* para a formação da geometria. A geometria foi exportada no formato *STEP* e editada (dividida no plano central vertical ortogonal às mesas, passando pela mediana da face da mesa do pilar e traçadas as linhas de referência para a extração dos dados) com auxílio do *software* de modelagem de sólidos tridimensionais Ansys SpaceClaim; então a geometria foi importada no *software* Ansys Workbench, onde foram definidos os materiais, as conexões, a malha, as condições de contorno e feita a simulação mecânica do carregamento da ligação.

Para reduzir o tempo de computação dos resultados da simulação, foi utilizado o comando de simetria utilizando o plano de corte definido na edição da geometria.

As propriedades mecânicas do aço especificadas para as simulações das ligações são peso específico, resistência ao escoamento, resistência de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*. Os valores das propriedades mecânicas do aço dos perfis (MR 250) e parafusos (ASTM A307) estão apresentados na tabela 5.

TABELA 5 – Propriedades mecânicas do aço dos perfis e dos parafusos

Aço		
f_y	250	MPa
f_u	400	MPa
f_{ub}	415	MPa
γ_{aco}	7850	kN/m^3
E_{MR250}	200	GPa
E_{A307}	205	GPa
ν	0,3	-

Sendo:

f_y : Resistência ao escoamento do aço MR250 (tensão e compressão);

f_u : Resistência última do aço (tensão e compressão);

$\gamma_{aço}$: peso específico do aço;

E : Modulo de elasticidade do aço;

ν : Coeficiente de Poisson do aço;

4.1.1 Malha e condições de contorno

A malha é formada por sólidos tridimensionais homogêneos de 20 nós (*solid186*) e 10 nós (*solid187*), com três graus de liberdade por nó (translação nas direções x , y e z) e deformação quadrática. Estes elementos são apropriados para malhas irregulares e análise de estruturas mecânicas. A geometria destes sólidos está ilustrada na Figura 24 (ANSYS, 2014).

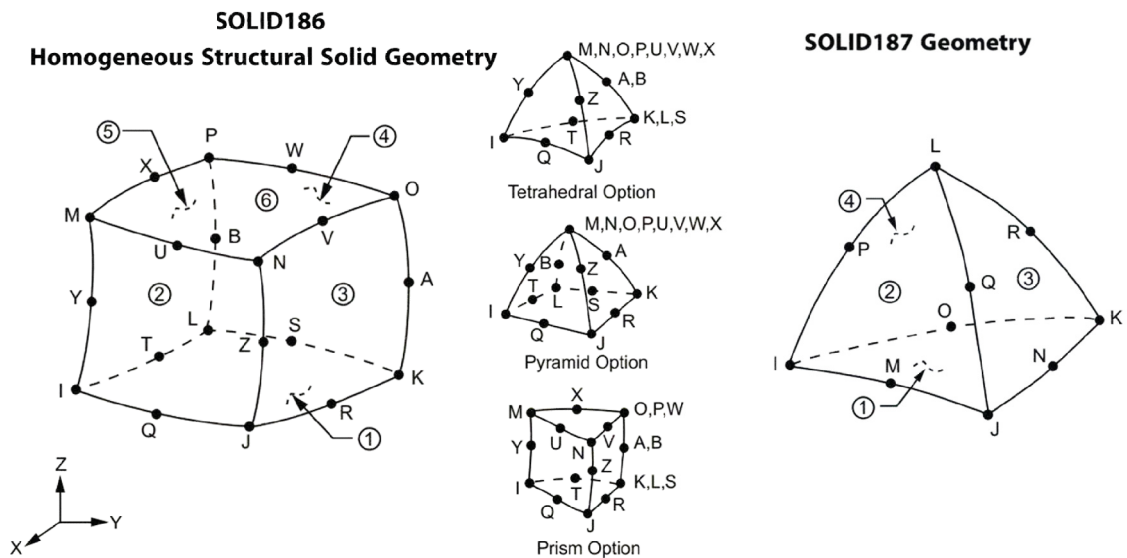


FIGURA 24 – Geometria dos elementos tridimensionais *solid186* e *solid187*

Fonte Adaptado de Ansys (2014)

As regiões de contato entre a viga e a chapa de topo e chapa de topo e pilar foram definidas pelo comando *contact sizing* (criando elementos de malha com dimensões similares na área de contato), com elementos de dimensões mínimas de $7mm$ para melhor representação dos furos. Nas regiões dos furos no pilar e na chapa de topo foram feitos refinamentos de malha, diminuindo o comprimento das arestas dos elementos de malha na face dos furos e face do fuste dos parafusos para $5mm$ de comprimento. Essas regiões foram formadas pelos elementos de contato superficiais *conta174* e *targe170*.

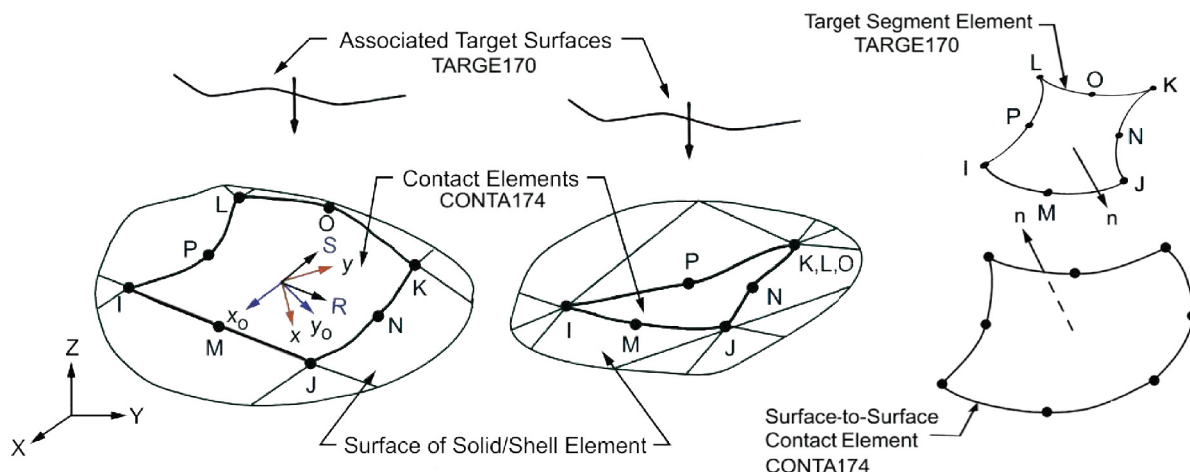


FIGURA 25 – Geometria dos elementos de contato *conta174* e *targe170*
 Fonte Adaptado de Ansys (2014)

O elemento *conta174* é um elemento de contato de superfície com oito nós, restringido contra penetração na superfície alvo. É aplicável em análises estruturais tridimensionais para representar contato e deslizamento entre superfícies deformáveis e está localizado na face dos sólidos tridimensionais que contêm nós intermediários entre seus vértices. O elemento *targe170* é o elemento que descreve os limites da superfície de contato da superfície de apoio do elemento *conta174*. O contato ocorre quando o elemento *conta174* penetra na face do elemento de contato *targe170*. A geometria dos elementos de contato está ilustrada na Figura 25 (ANSYS, 2014).

A malha foi gerada de forma que a concentração de elementos fosse mais densa na região de atuação da ligação e menos densa nas extremidades do pilar e viga, onde a distribuição de tensões não é significativa para a análise do comportamento da ligação em específico. A transição entre as dimensões dos elementos de malha da região mais densa para as regiões de malha mais leve se dá de forma gradual, crescente a uma taxa de 10% (*sizing growth rate 1,1*).

Os contatos entre a face da chapa de topo e a face da mesa do pilar, e entre o fuste dos parafusos e face interna dos furos foram definidos como atrito nulo (*frictionless*), permitindo o deslizamento e a separação irrestritos entre superfícies. O contato entre a cabeça dos parafusos e a face de contato na chapa de topo e pilar foi definida como rugoso (*rough*). Este contato não permite o deslizamento tangencial (o coeficiente de atrito tende ao infinito), mas permite a separação entre as faces, de modo que não gera tensões de compressão nos parafusos, como no caso da utilização do contato de aderência total (*bonded*). As extremidades do pilar foram engastadas e foi aplicada uma força vertical total de 5 kN (duas vezes 2,5 kN devido à utilização da simetria), como componente de forças no eixo Z.

4.1.2 Descrição geométrica das ligações

As ligações foram nomeadas de acordo com os perfis do pilar e da viga, número e diâmetro dos parafusos e espessura da chapa de topo. Em algumas ligações foi alterada apenas a distância horizontal entre parafusos e foi indicado ao final da nomenclatura, na forma: $[pilar]_{[viga]}[n^{\circ}parafusos]\phi[diâmetro]_{[espessura-chapa-de-topo]}[\pm g]$

A ligação é composta por um pilar com comprimento total de 4 metros, engastado nas duas extremidades, sendo que a ligação está centrada no comprimento do pilar, como ilustrado na Figura 26. A viga tem 2 metros de comprimento, ligada à chapa de topo e simuladas como um único sólido.

As dimensões da chapa de topo seguem o padrão apresentado na Figura 26. A altura da chapa é $50mm$ maior que a altura da viga e $20mm$ mais larga. Os furos inferiores estão localizados à $87,5mm$ acima da borda inferior da chapa de topo (exceto no caso de ligações com a viga de $150mm$ e $200mm$, onde esta distância é de $67,5mm$). Os furos superiores estão localizados a $67,5mm$ da borda superior da chapa de topo.

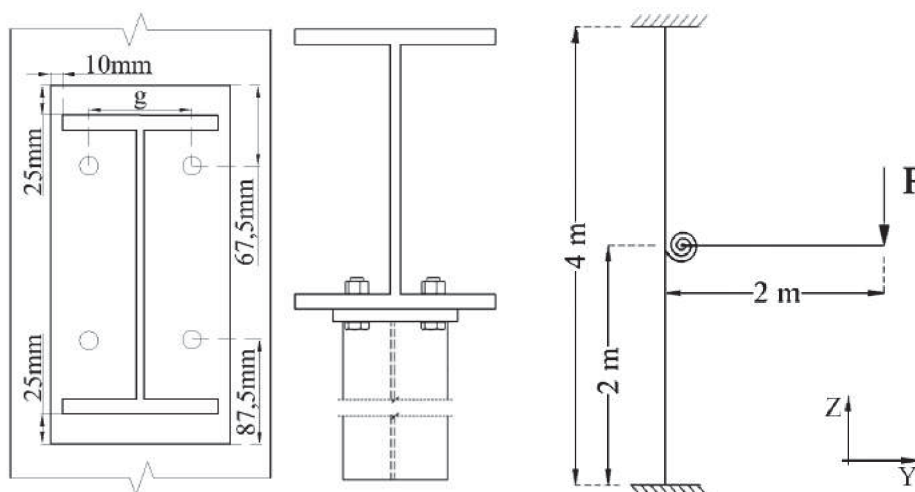


FIGURA 26 – Dimensões padrão das ligações e condições de contorno

Os parafusos adotados para esta análise são de cabeça sextavada, tipo ASTM A307, com diâmetros de $12,7mm$, $16mm$ e $19mm$. A espessura adotada para a chapa de topo é menor ou igual à espessura da mesa do pilar, sendo que os valores foram arredondados para o número inteiro menor. Os furos na chapa e pilar são de $14,2mm$, $17,5mm$ e $21,5mm$ de diâmetro (adotado furo padrão NBR 8800:2008). Os parafusos estão dispostos simetricamente em relação à linha central vertical da alma da viga e cada linha de parafusos possui dois elementos.

As ligações simuladas e suas dimensões estão listadas no Apêndice A, Tabela 6. Todos os perfis estão listados na norma ABNT:NBR5884, perfis soldados séries CVS e série VS (ABNT-NBR5884, 2013).

4.2 Cálculo da Rigidez Rotacional

Foram extraídos os valores do vetor principal de deformação (*Vector Principal Elastic Strain*) da alma dos pilares (linhas destacadas na Figura 27 (a)), a deformação direcional (*Directional Deformation*) da chapa de topo e mesa do pilar nas linhas verticais passando pelo centro geométrico dos parafusos (*LVP*), pela linha vertical central da ligação (*LVC*) e pela linha central vertical da mesa oposta à ligação, e nas linhas horizontais que passam pelos parafusos superiores (*LHS*) e inferiores (*LHI*) no contato entre chapa de topo e mesa do pilar (linhas destacadas na Figura 27 (b)).

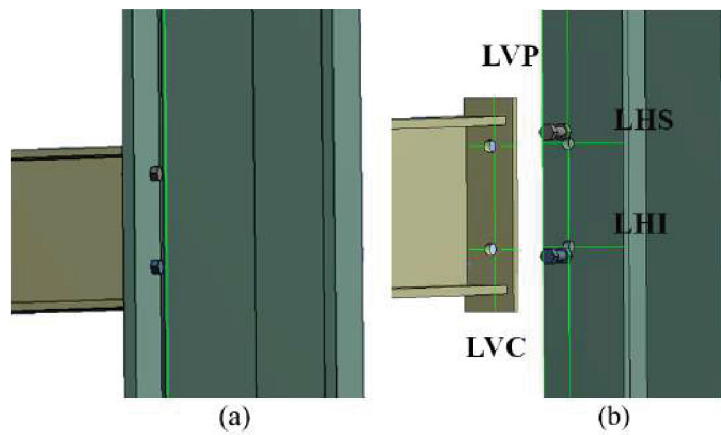


FIGURA 27 – Marcação das linhas para extração dos dados

Os valores de deformação foram obtidos através da rotação do vetor de deformações principais, calculados na linha vertical localizada a $10mm$ da face interna da mesa do pilar (Figura 27 (a)), de forma a evitar a concentração das tensões provocadas pela flexão das almas do pilar.

A rigidez rotacional da ligação foi calculada pela divisão do momento aplicado na ligação (M) pelo ângulo de rotação local da ligação (θ_{local}), de acordo com a equação 4.1.

$$S_j = \frac{M}{\theta_{local}} \quad (4.1)$$

O ângulo de rotação da ligação foi considerado como a rotação total da ligação menos a rotação global da ligação, como ilustrado na Figura 28. Os ângulos foram calculados pela inclinação de equações de aproximação lineares, calculadas automaticamente pelo *software Microsoft Excel*.

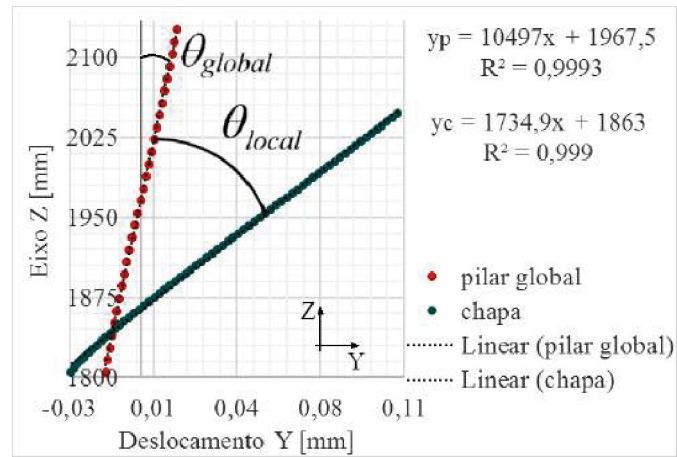


FIGURA 28 – Ângulos de rotação utilizados para o cálculo da rigidez rotacional da ligação

Os resultados do cálculo da rotação e rigidez rotacional de todas as ligações estão apresentados no Apêndice A, Tabela 9. Os gráficos e equações para o cálculo das rotações estão inclusos no Apêndice B.

5 COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS

A solicitação de cada elemento da ligação varia de acordo com as dimensões da ligação. A tensão nos parafusos é influenciada pela altura da viga e a distância horizontal entre parafusos (g). A altura da viga está relacionada com o comprimento de alavanca entre região comprimida e região tracionada, modificando a intensidade do binário de forças formado pelo momento aplicado na ligação. O deslocamento das abas da mesa do pilar é proporcional à distância g , quanto menor for este deslocamento, maior será o alongamento dos parafusos superiores. Com o aumento desta dimensão o alongamento do parafuso tende a ser menor, porém a flexão do fuste dos parafusos imposta pela inclinação das abas da mesa do pilar e chapa de topo é maior, sendo assim, quanto maiores forem estas dimensões menor será a tensão nos parafusos superiores.

Outro fator que influi no comportamento dos parafusos superiores é a rigidez à flexão dos elementos da ligação. A espessura da mesa do pilar indica a rigidez à flexão deste elemento; quanto mais espessa, maior será a restrição ao deslocamento provocado pela tração transmitida pelos parafusos e maior será o alongamento do fuste dos parafusos. A chapa de topo é enrijecida pela viga; sendo assim, quanto mais próximos da alma ou mesa da viga forem os furos, menor será o deslocamento da chapa de topo e maior será a solicitação dos parafusos.

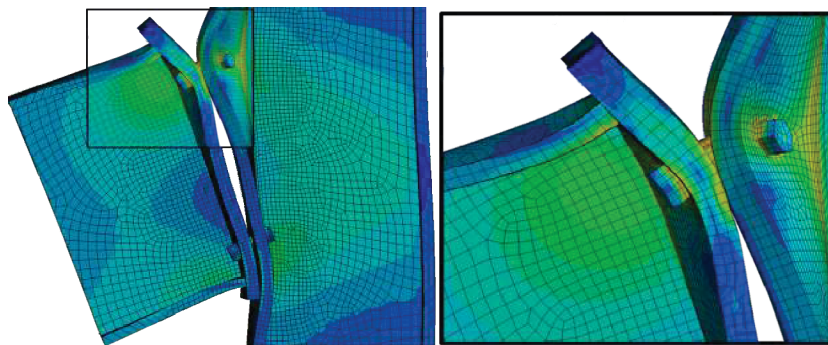


FIGURA 29 – Detalhe da flambagem local da mesa superior da viga

A viga apresenta flambagem das mesas na região de interseção com a chapa de topo. Ao transmitir esforços da viga aos parafusos a chapa de topo sofre flexão e ao deformar acrescenta tensões locais na mesa superior da viga, o que provoca a flambagem local da mesa superior da viga (ilustrado na Figura 29) e modifica a inclinação da linha central vertical da chapa de topo na porção acima dos parafusos. Na região inferior da chapa a área que permanece em contato com a face do pilar apresenta uma curvatura mais acentuada, forçada pelo contato entre superfícies e a abertura angular entre chapa de topo e mesa do pilar, o que também provoca flambagem da mesa inferior da viga, porém com

intensidade menor.

O pilar apresenta rotação global provocada pelo momento transmitido pela viga, e um efeito localizado, devido à forma de transmissão da carga entre viga e pilar. O efeito localizado pode ser dividido em duas parcelas: uma referente à alma e outra à mesa do pilar. O carregamento se desenvolve de formas diferentes: na alma a distribuição de esforços têm forma não uniforme no eixo axial da chapa, gerando esforços de tração e compressão axiais; já na mesa do pilar o carregamento é perpendicular, de forma concentrada na região dos parafusos tracionados e distribuída na região de compressão. A transmissão dos esforços de tração pelos parafusos gera flexão local das abas da mesa do pilar.

A alma do pilar apresenta deformação local tanto na região comprimida quanto na região tracionada da ligação. A distribuição de esforços e deformação são não uniformes e assimétricas, com formato similar ao apresentado na Figura 30, uma função trigonométrica ímpar onde a parte comprimida tende a ser mais concentrada e com intensidade maior que a apresentada na parte tracionada. A região central do gráfico varia de comprimento e inclinação, dependendo da geometria da ligação.

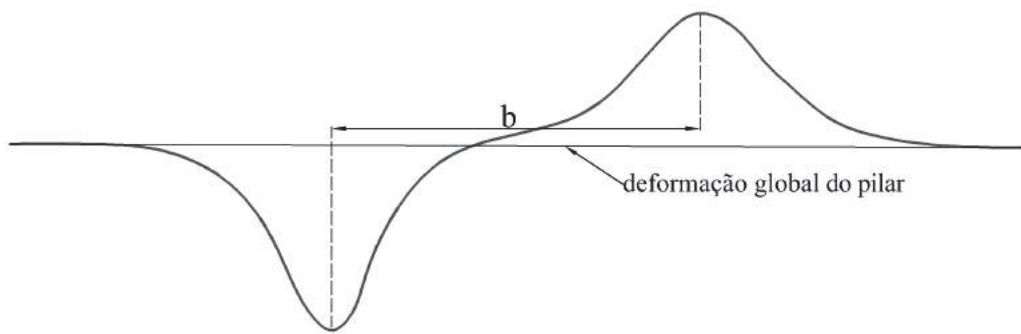


FIGURA 30 – distância b

Esta deformação pode ser aproximada pela Equação 5.1, porém é necessária a utilização de valores distintos das constantes de multiplicação para a deformação positiva e negativa, pois a deformação tem por padrão ser assimétrica.

$$f(x) = \frac{\frac{P.a}{E.t_{wp}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (x+c)}{b}\right) e^{-d \cdot \cos\left(\frac{f \pi \cdot (x+c)}{b}\right)}}{1 + e^{\sqrt{x^2 - b}}} \quad (5.1)$$

A equação possui cinco constantes que variam para cada ligação. A constante a modifica a amplitude do gráfico. A constante b (ilustrada na Figura 30) representa a distância entre picos, os quais ocorrem aproximadamente abaixo da mesa inferior da viga e aproximadamente acima dos parafusos superiores. A constante c indica a translação horizontal do gráfico. Para simplificar a análise os deslocamentos foram centralizados de forma que $c = 0$, reduzindo uma incógnita da equação. Os resultados não são afetados, pois para o cálculo da rotação da ligação são usados os valores da equação nos picos,

independentemente do ponto inicial de referência. A constante d modifica a amplitude dos picos da equação e desloca levemente os picos na direção horizontal, e a constante f desloca os picos horizontalmente e ajusta a curvatura do gráfico nos extremos após os picos (parte externa aos picos). Para delimitar o gráfico às deformações do modelo foi utilizada a função *Sigmoid* adaptada para uma função par (a função *Sigmoid* tem forma em S e foi usada no divisor da equação 5.1).

Ambas as constantes a e d modificam a amplitude do gráfico, a constante a multiplica diretamente os valores, e a constante d amplia o pico de acordo com a função $c_1 * e^{c_2*d}$. As constantes para c_1 e c_2 variam com o valor de f , porém para os casos analisados a diferença pode ser desprezada (entre $f = 2,3$ e $f = 2,0$ a função variou aproximadamente 1,4%), sendo adotadas as constantes $c_1 = c_2 = 1,0$, referentes a $f = 2,0$.

A equação de aproximação da deformação foi obtida por um método assintótico, a partir de funções trigonométricas, de forma a descrever aproximadamente o padrão de deslocamentos apresentados na análise tridimensional da ligação.

O ajuste da curva foi feito utilizando o pacote python *lmfit*, uma biblioteca para otimização não linear e ajuste de dados com base na função *scipy.optimize*. O pacote utiliza objetos-parâmetro flexíveis quanto a sua definição e oferece o algoritmo de otimização de curvas *mínimos quadrados*, o qual foi utilizado neste trabalho, (NEWVILLE et al., 2014).

As ligações com o pilar CVS400x87 foram feitas com vigas de diferentes alturas e variação no parâmetro g' (distância entre parafuso e alma do pilar). As deformações da alma do pilar destas ligações estão representadas na Figura 31.

Pode-se observar na Figura 31 que, com o aumento da altura da viga, mantendo a distância horizontal entre parafusos g (representadas pelas linhas contínuas), as deformações tendem a diminuir tanto na região comprimida quanto na região tracionada. A distância entre os parafusos influencia na distribuição de esforços, o que pode ser observado pela diferença de deformação entre as linhas contínuas, tracejadas e pontilhadas, sendo que quanto maior for a distância horizontal entre os parafusos mais distribuída será a tensão de tração na alma e menor será a deformação positiva da alma. Na região comprimida há uma pequena translação horizontal; porém, a intensidade da deformação não apresentou variação relevante.

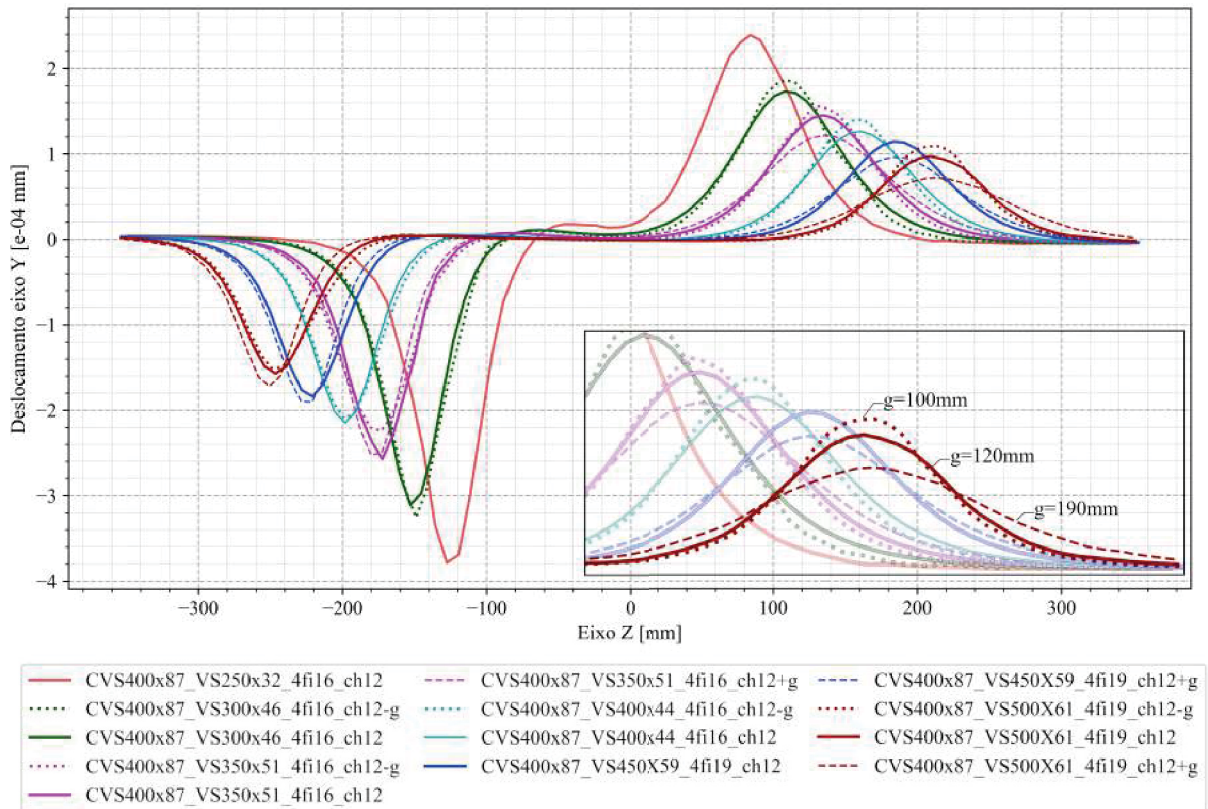


FIGURA 31 – Representação da variação da deformação da alma de acordo com a variação da altura da viga e g

A distância horizontal entre parafusos influencia na transmissão de esforços entre mesa e alma do pilar: quanto mais próximos à alma, mais concentrada será a distribuição da tração na alma do pilar e, conseqüentemente, maior será a intensidade da deformação local, como pode ser observado na Figura 31 entre as linhas contínuas, as linhas tracejadas (com aumento de g) e as linhas pontilhadas (com redução de g) de mesma cor, onde houve redução da deformação máxima positiva nas ligações onde o g foi aumentado, e aumento da deformação máxima positiva onde o parâmetro g foi reduzido.

Na região de compressão parte do esforço é transmitido diretamente à alma e outra parcela (menor) é transmitida à mesa do pilar, devido à flexão que as abas da alma sofrem quando comprimidas pela chapa de topo.

Os pontos da malha na linha vertical da alma do pilar das ligações com o pilar CVS350x105 e com a viga VS250x37, com variações na espessura da chapa de topo, diâmetro dos parafusos e distância horizontal entre os parafusos estão representados na Figura 32.

Observa-se na Figura 32 que com a redução da espessura da chapa de topo houve aumento na intensidade da deformação negativa da alma do pilar, devido à menor área de distribuição de esforços causada pela redução da resistência à flexão da chapa de topo na parte inferior da viga, o que causa compressão em uma área mais concentrada e conseqüentemente gera deformação maior nesta região.

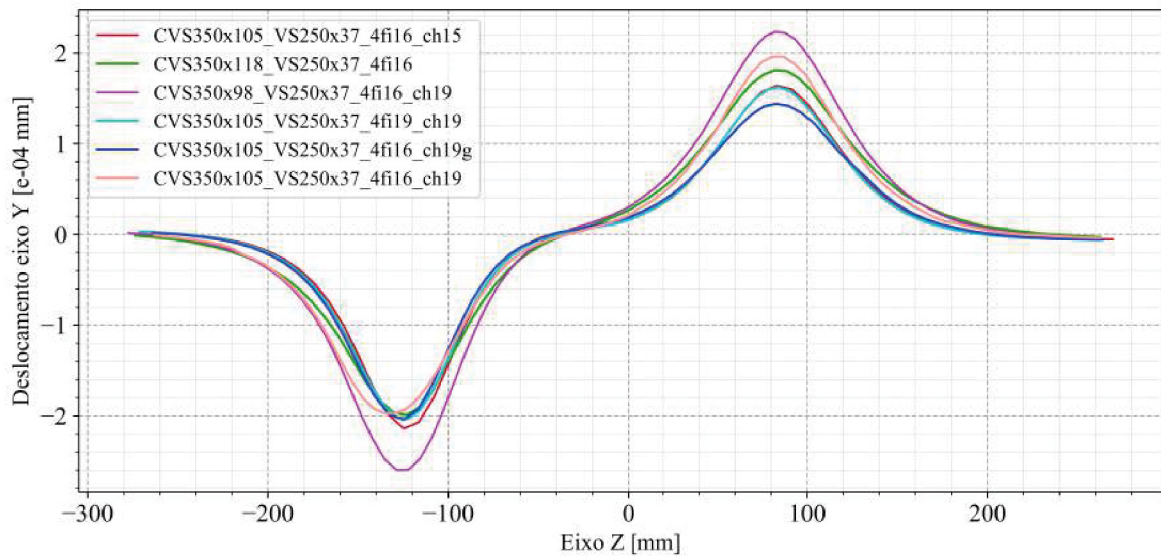


FIGURA 32 – Deformação apresentada pelas variações da ligação CVS350X105_VS250

Com a redução da distância horizontal entre os parafusos houve aumento na deformação positiva da alma do pilar e a distribuição da deformação é mais concentrada. Já na parte comprimida, como houve menor rotação da chapa de topo em relação à mesa do pilar (devido à menor flexão das abas da mesa do pilar), a área de contato é maior, portanto houve uma leve redução na intensidade da deformação negativa. O intervalo entre os picos é proporcional à distância entre a parte inferior da viga e o parafuso; quanto mais alta a viga, menor a inclinação da parte central do gráfico e mais distantes entre si estarão os picos.

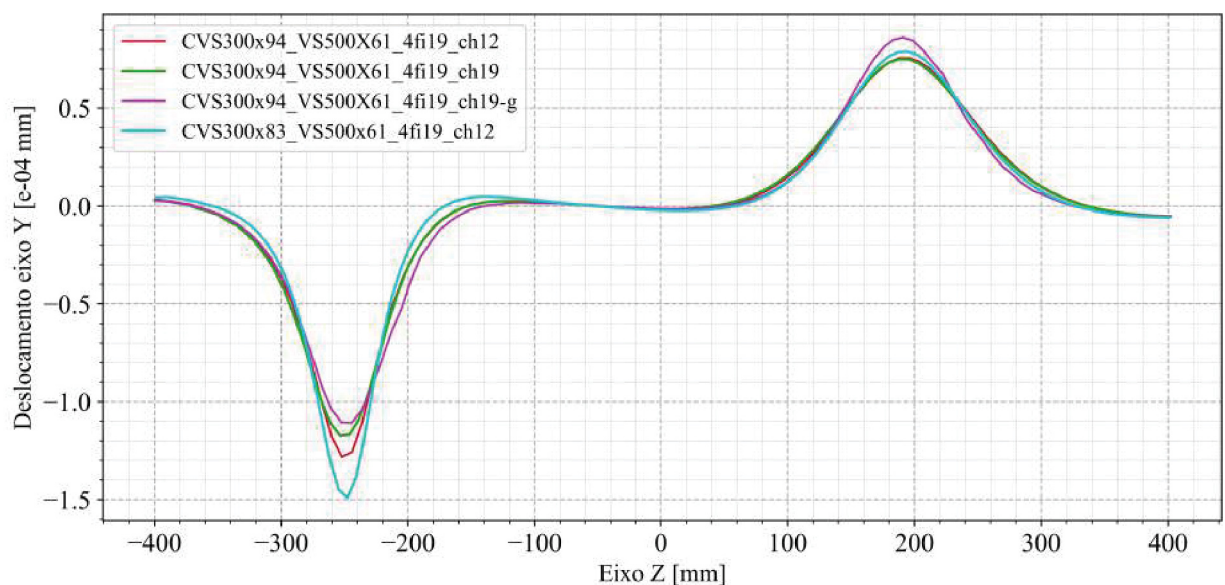


FIGURA 33 – Deformação da alma do pilar nas ligações feitas com a viga VS500X61, variando espessura da chapa de topo e distância horizontal entre parafusos

A espessura da alma influencia na concentração da distribuição de esforços na alma do pilar. Pode ser observado na Figura 33 que ao se reduzir a espessura da alma do pilar, mantendo a altura do perfil e espessura da mesa, a deformação aumenta significativamente e fica mais distribuída.

Os valores das constantes aplicadas na equação 5.1 para cada uma das ligações estão no Apêndice A, Tabela 7.

A chapa de topo e mesa do pilar são solicitadas perpendicularmente à sua face e sofrem flexão durante o carregamento. Na parte superior o carregamento é transmitido pelos parafusos e na parte inferior a transmissão é dada pelo contato direto entre as faces da chapa de topo e mesa do pilar.

O deslocamento dos pontos da mesa e chapa de topo reduzem com o aumento da altura da viga (como pode ser observado na Figura 34 e 35), pois a tensão na região superior da ligação tende a reduzir com o aumento do braço de alavanca z entre parafusos superiores e área comprimida da ligação.

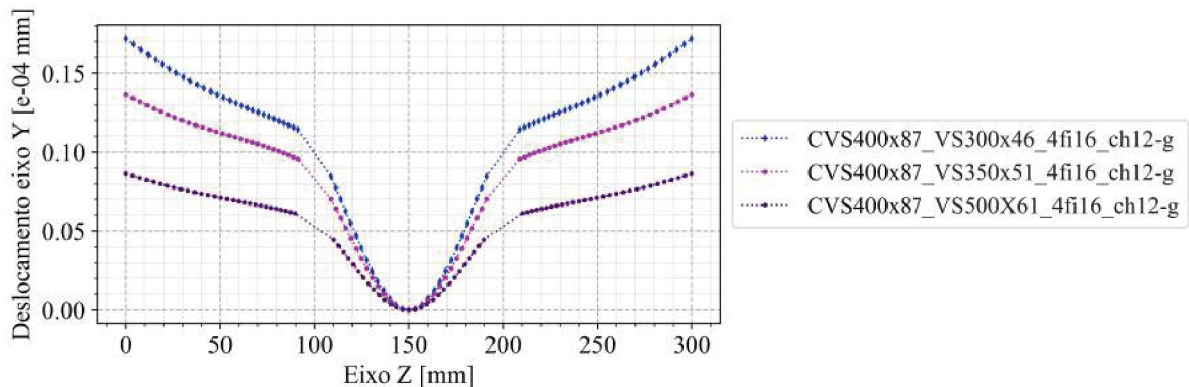


FIGURA 34 – Deslocamento das abas da mesa das ligações com pilar CVS400X87, variando a altura da viga e mantendo a distância horizontal entre os parafusos de $g = 100mm$

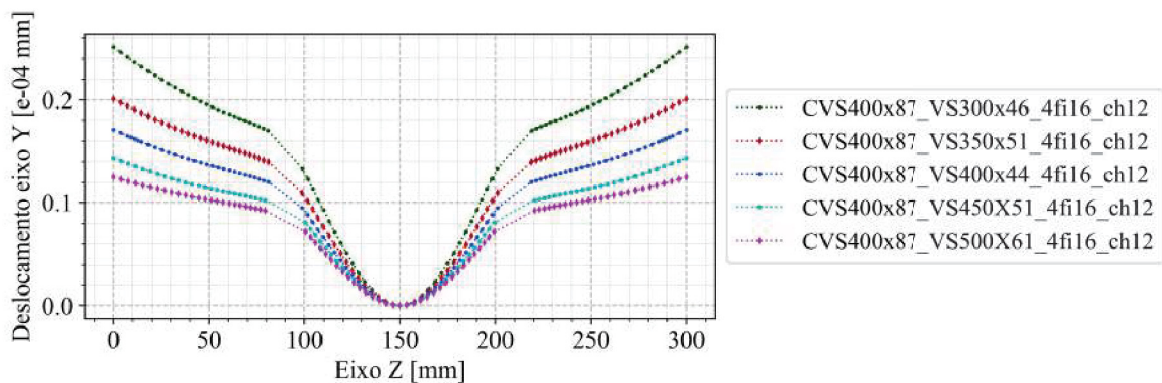


FIGURA 35 – Deslocamento das abas da mesa das ligações com pilar CVS400X87, variando a altura da viga e mantendo a distância horizontal entre os parafusos de $g = 120mm$

A ampliação da distância g acarreta no aumento do deslocamento horizontal da mesa do pilar, como ilustrado nas Figuras 36 e 37.

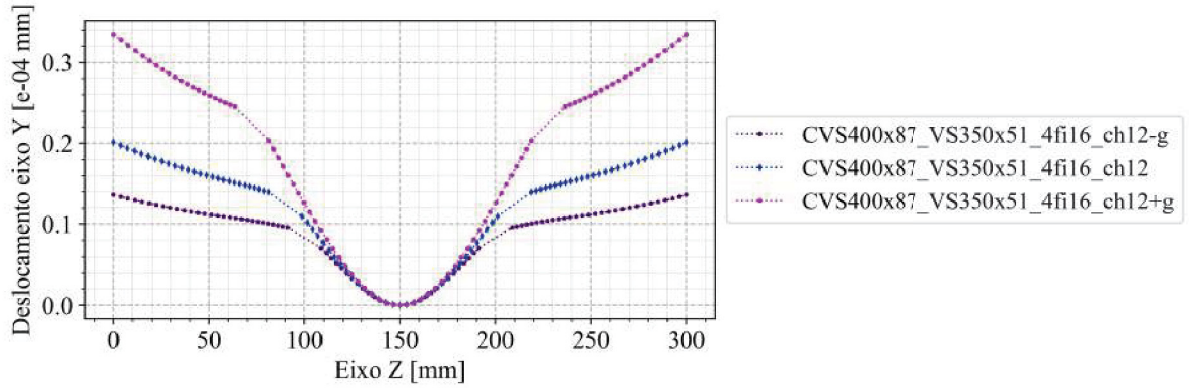


FIGURA 36 – Deslocamento da mesa do pilar nas ligações com as vigas VS350X51, com aumento da distância horizontal entre parafusos g

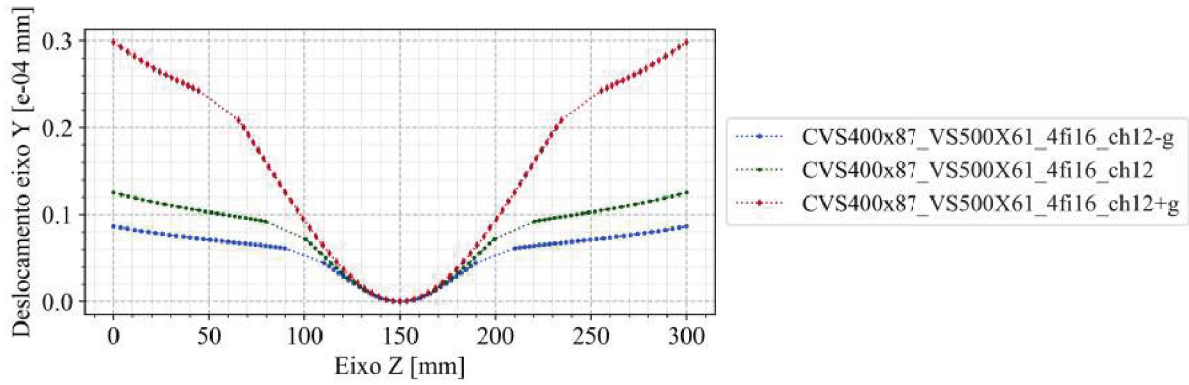


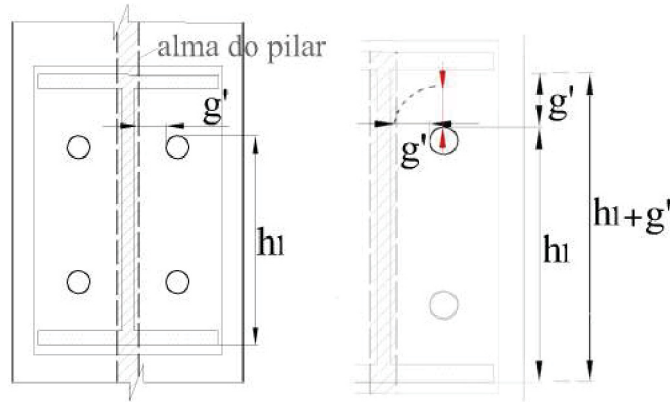
FIGURA 37 – Deslocamento da mesa do pilar nas ligações com as vigas VS500X61, com aumento da distância horizontal entre parafusos g

A inclinação menor na porção externa aos parafusos da mesa não indica, necessariamente, que houve *efeito alavanca* entre a mesa do pilar e chapa de topo. Isso pode ser efeito da rigidez à flexão das abas da mesa do pilar, da flexão contrária da região comprimida, ou da atuação de ambos.

Considerando essas informações, o cálculo da intensidade das forças de compressão na alma do pilar foi feito em função da distância entre a base da viga e a parte superior do parafuso (Equação 5.3). Para a parte tracionada foi adicionada a parcela referente à distância horizontal entre parafuso e alma do pilar (Equação 5.2). Estes parâmetros estão ilustradas na Figura 38.

$$P_{positivo} = \frac{M_{lig}}{h_1 + g'} \quad (5.2)$$

$$P_{negativo} = \frac{M_{lig}}{h_1} \quad (5.3)$$

FIGURA 38 – distâncias h_1 e g'

Para estimar o deslocamento da chapa de topo e mesa do pilar é possível utilizar uma analogia ao perfil T equivalente reduzido para uma viga: as abas da mesa ou chapa de topo formam uma viga de base unitária e altura igual à espessura do elemento, com comprimento l , apoiadas nas extremidades e carregada no centro (alma do perfil T) por uma carga equivalente P_{eq} (ilustrado na Figura 39). Com intensidade determinada pela equação da linha neutra e o deslocamento da mesa ou chapa de topo apresentados na simulação tridimensional.



FIGURA 39 – Idealização do comportamento das mesas do pilar e chapa de topo

A carga P_{eq} (Equação 5.5) foi calculada pela equação do deslocamento dos pontos de uma barra submetida à flexão (derivada da Equação elástica da linha elástica, 5.4), em função da deformação da chapa de topo ou mesa do pilar, resultando na Equação 5.5.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{-M(x)}{EI} \quad (5.4)$$

$$P_{eq} = \frac{96EIv_{max}}{5l^3} \quad (5.5)$$

Onde:

$M(x)$: Função do momento de inércia da viga idealizada;

E : Módulo de elasticidade do aço;

I : Momento de inércia da viga com base unitária e altura igual a espessura do elemento;

v_{max} : Deslocamento no centro da chapa de topo ou mesa do pilar na linha dos parafusos superiores;

l : Comprimento da viga igual à $g - \frac{\phi_b}{2}$

A Figura 40 apresenta a relação entre P_{cal} e P_{eq} para a mesa do pilar nas ligações feitas com o pilar CVS400x87, mantendo o valor de g fixo e variando a viga, e a relação entre P_{cal} e P_{eq} mantendo a viga e variando o g .

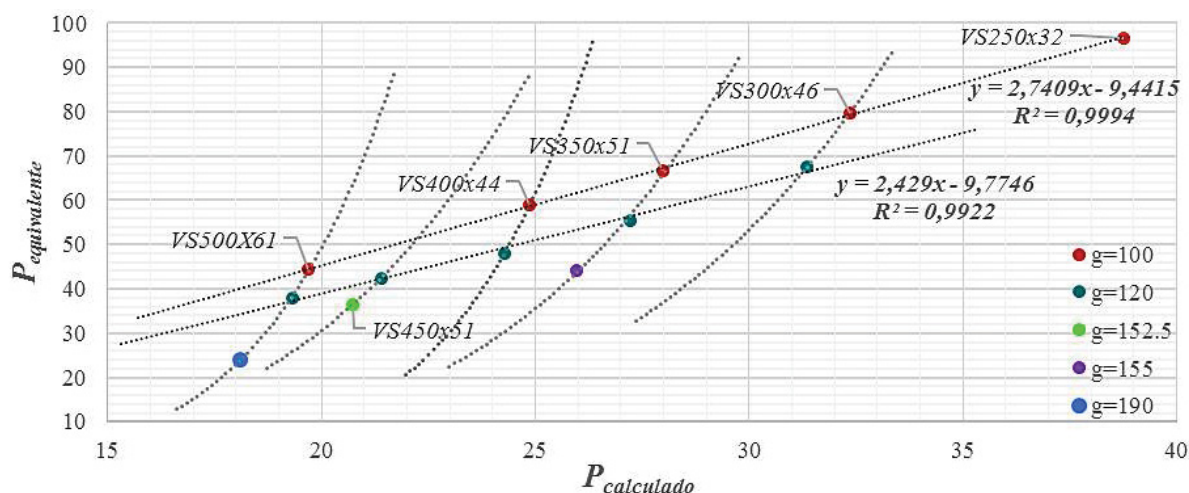


FIGURA 40 – Correlação entre P_{cal} e P_{eq} para a mesa das ligações com o pilar CVS400x87

Analisando a correspondência entre o carregamento calculado (P_{cal}) e o carregamento equivalente aplicado na viga simplificada (P_{eq}) em ligações com o mesmo pilar, espessura da chapa de topo, parafusos e valor de g , variando a altura da viga, os valores P_{eq} decrescem com o aumento do comprimento de alavanca (proporcional à altura da viga e à P_{cal}) e têm relação linear entre si. Em relação ao parâmetro g , com o aumento deste valor a força efetiva atuante na ligação decresce, com relação não linear. Neste gráfico foram utilizadas linhas de tendência exponenciais para a representação das relações $P_{cal} \times P_{eq}$ em ligações de mesma viga, porém são necessários mais dados para estabelecer com acurácia esta relação.

A tensão aplicada nos parafusos varia com as dimensões da ligação, principalmente a altura de alavanca entre região comprimida e a região tracionada, a distância horizontal entre parafusos e a rigidez à flexão da chapa de topo e mesa do pilar, o que torna mais complexo o cálculo da tensão efetiva que atua nos parafusos. Além disso ainda é necessária a consideração do efeito localizado que a flexão do parafuso causa, acarretando em aumento de tensões em parte do fuste do parafuso.

Os resultados dos cálculos da carga resistente máxima de cada ligação, a rigidez inicial calculada pelo método apresentado no Eurocode-3 (2005), calculados por Zanoni (2015), a rotação local e rigidez rotacional calculadas pela análise tridimensional estão no Apêndice A, Tabela 9.

Os resultados do cálculo da rotação global do pilar de cada ligação, considerando a ligação como engastada (calculada pela função da Linha Elástica dada pela Equação 5.4) e semirrígida (análise tridimensional) e a relação percentual entre as duas está apresentado

no Apêndice A, na Tabela 10.

Como pode ser observado na Tabela 10 (Apêndice A) a rotação global do pilar na análise tridimensional ficou entre 1,9% e 7% da rotação teórica obtida na análise de ligações engastadas, indicando que o momento transmitido ao pilar foi consideravelmente menor que o teórico para ligações engastadas, com comportamento mais aproximado à uma ligação rotulada.

A seguir estão apresentados alguns dos resultados obtidos na análise tridimensional das ligações, os demais resultados estão no Apêndice B. As dimensões estão indicadas em milímetros e as escalas de representação dos eixos não são proporcionais.

A Figura 41 apresenta os deslocamentos obtidos na análise da ligação CVS250X47 VS300X25_4fi16_ch12. Os deslocamentos das linhas da face da mesa do pilar estão representados em vermelho e os referentes à chapa de topo em verde escuro. Os resultados descrevem os deslocamentos totais da ligação (rotação global do pilar e deslocamentos locais dos componentes da ligação). A linha pontilhada em preto mostra somente a rotação global do pilar, medida na linha vertical passando pela mediana da face da mesa do pilar contrária à ligação. Também estão apresentados os resultados dos deslocamentos obtidos nas linhas horizontais superior (LHS, Figura 41 (b)) e inferior (LHI, Figura 41 (c)) passando pelos parafusos.

Observa-se que na região inferior da ligação, na linha dos parafusos (LHI), a transmissão da compressão é feita pelo contato entre chapa de topo e mesa do pilar nas regiões externas aos parafusos. Na linha superior (LSP) ha contato entre a borda da chapa de topo e a face da mesa do pilar.

Observa-se Figura 41 (c) que a área de contato da região de compressão se inicia abaixo da linha inferior dos parafusos e o deslocamento positivo das abas da mesa interferem na região inferior, fazendo com que parte da mesa apresente deslocamento contrário à compressão aplicada pela chapa de topo.

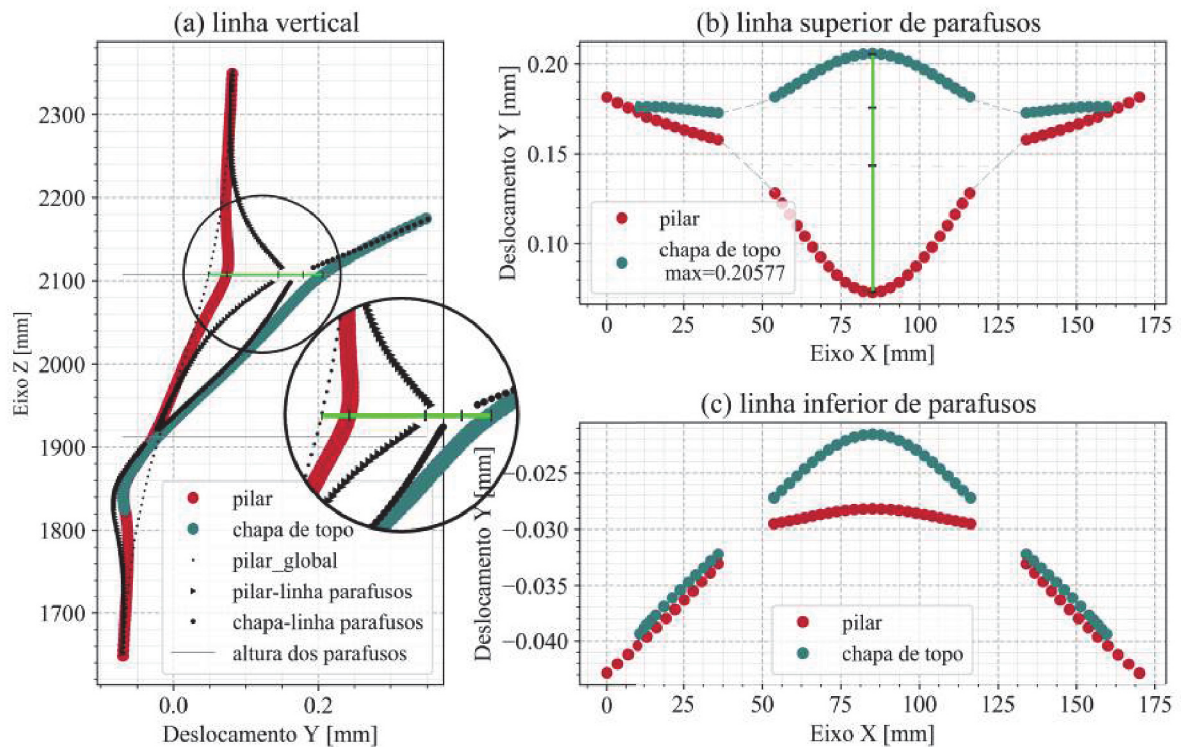


FIGURA 41 – Deslocamento total da ligação (a) linhas verticais, (b) linha horizontal parafusos superiores, (c) linha horizontal parafusos inferiores, ligação CVS250X47_VS300X25_4fi16_ch12

Pode-se observar há flexão negativa da mesa do pilar, e as abas da mesa e chapa de topo na região superior não estão em contato após o fim do carregamento. A deformação das abas da mesa e da chapa de topo provocam flexão nos parafusos, tanto no plano ZY quanto no plano XY , o que aumenta a sollicitação mecânica do parafuso em algumas partes de sua seção transversal.

A rotação total da ligação é composta pela rotação global do pilar e pela rotação local da ligação (abertura angular em relação à linha global do pilar deformado). A Figura 41 (a) está mostrando a disposição dos deslocamentos que formam a abertura angular (rotação local) da ligação, composta pela deformação da alma do pilar (nas regiões de tração e de compressão), pela flexão das abas da mesa do pilar, pelo alongamento dos parafusos e pela flexão da chapa de topo. Para a contribuição da chapa de topo e mesa do pilar foi considerada a porção de deslocamento entre o valor na seção média vertical da ligação e a média simples entre o valor dos deslocamentos nos pontos de intersecção com o parafuso, como destacado no detalhe da Figura 41 (a) e (b).

Observa-se na Figura 41 que a chapa de topo deforma menos que a mesa do pilar. Em ligações onde a chapa de topo tem a mesma espessura ou espessura maior, a chapa de topo tende a apresentar deslocamentos menores do que a mesa do pilar, pois a chapa de topo é mais rígida devido a conexão com as mesas da viga.

A abertura angular da ligação e a representação das linhas de tendência para o cálculo da rigidez rotacional estão apresentados na Figura 42.

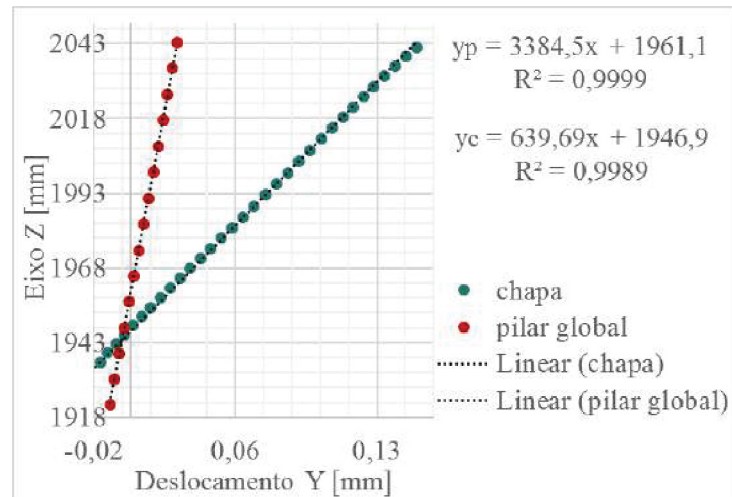


FIGURA 42 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS250X47_VS300X25_4fi16_ch12

Pode-se observar novamente na Figura 43 (a) que com o aumento do g a rotação da ligação tende a ser predominantemente comandada pela deformação da mesa do pilar e da chapa de topo.

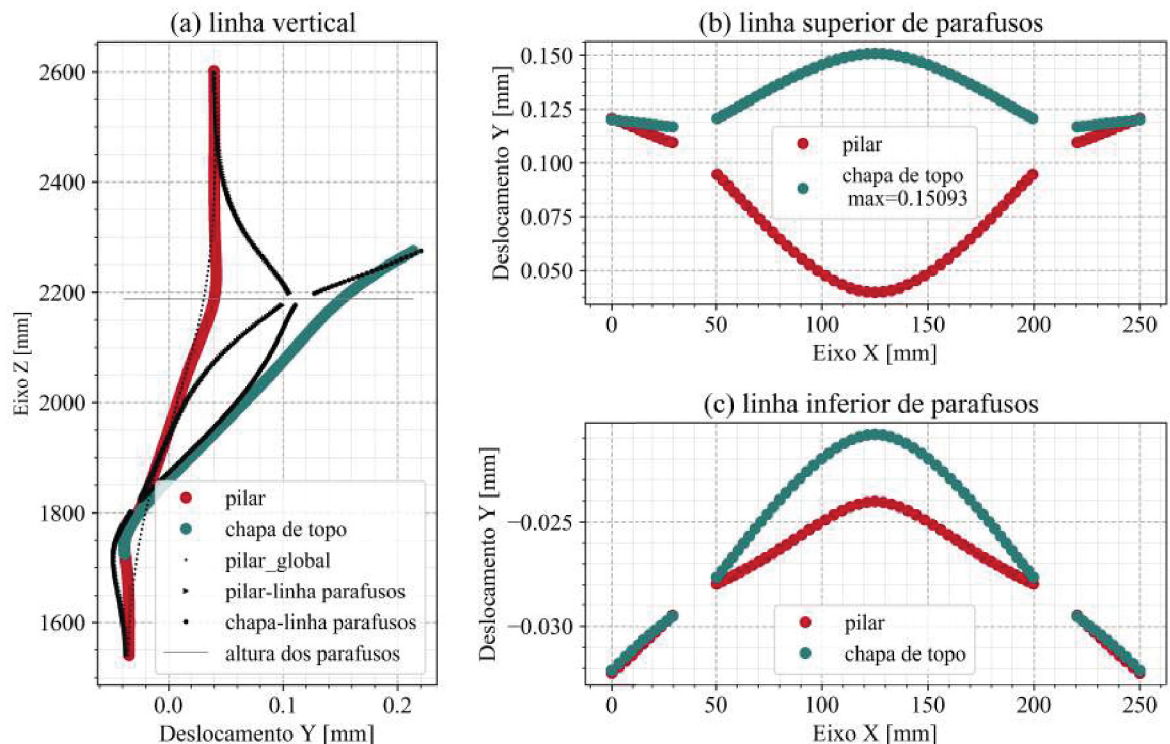


FIGURA 43 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X83_VS500X61_4φ19_ch12

Observa-se na Figura 43 (b) que as extremidades da chapa de topo e mesa do pilar permanecem em contato após o carregamento e ha o *efeito alavanca* (aumento da solicitação do parafuso devido à alavanca formada entre a mesa do pilar e chapa de

topo), o que causa com que a chapa de topo apresente deslocamento da região externa aos parafusos com inclinação negativa.

A Figura 44 apresenta a rotação local e global da ligação. Nota-se que a rotação global do pilar é maior do que a apresentada na ligação CVS250X47_VS300X25_4fi16_ch12.

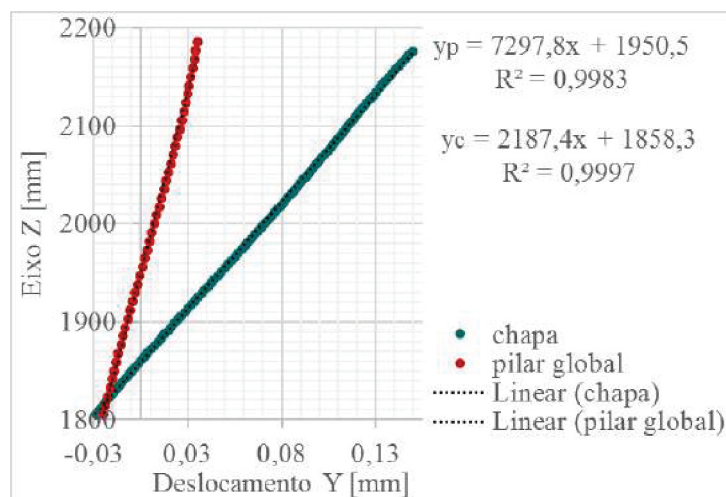


FIGURA 44 – Ângulo de rotação, ligação CVS300X83_VS500X61_4φ19_ch19

Observa-se na Figura 45 (a) que a abertura angular entre pilar e chapa de topo é dada principalmente pela deformação da mesa e chapa de topo, com pequena participação da deformação da alma do pilar e quase nenhum alongamento do parafuso, como pode ser observado na Figura 45 (b), onde a chapa de topo e mesa do pilar permanecem totalmente em contato na região externa aos parafusos. O mesmo ocorre na região da linha inferior dos parafusos, porém o contato direto entre chapa de topo e alma do pilar ocorre abaixo desta linha.

A espessura das mesas do pilar favoreceram a deformação por flexão e, devido à extensão da região externa aos furos ser relativamente grande em comparação com a região interna, a deformação da região superior se prolonga até a região de compressão da ligação e provoca o deslocamento contrário das abas na parte externa à chapa de topo, como pode ser observado na Figura 45.

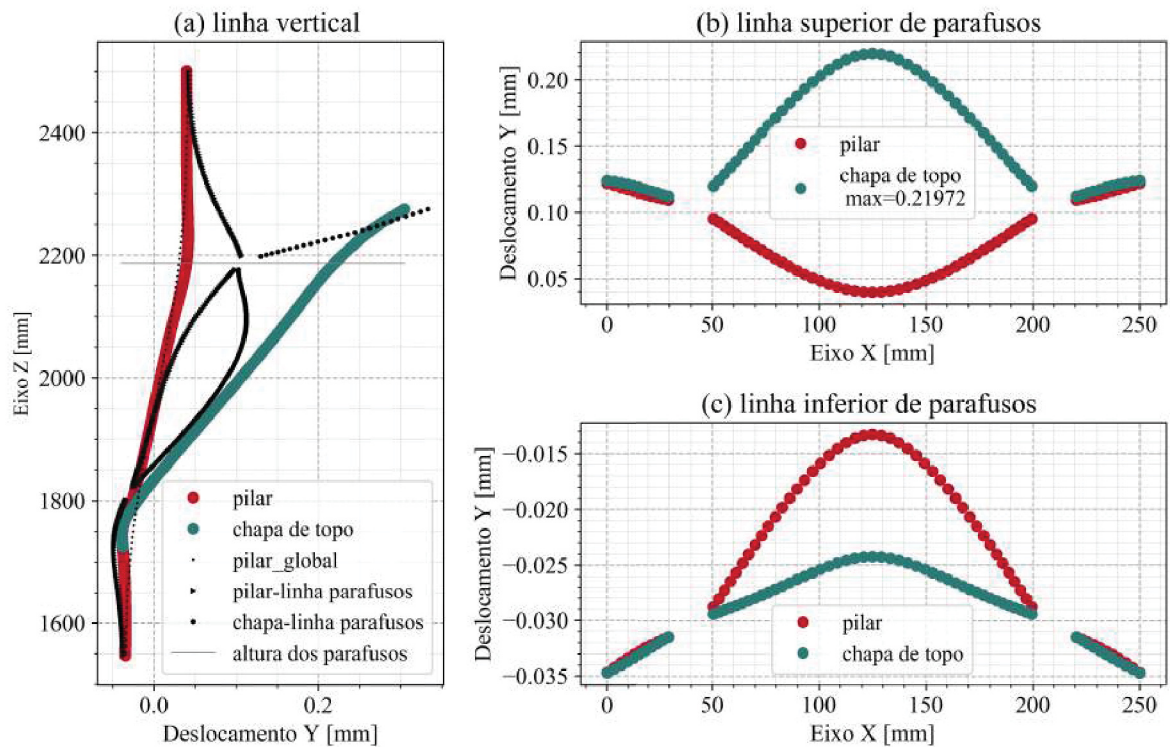


FIGURA 45 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X94_VS450X51_4φ19_ch12

Observa-se na Figura 46 (c) que os parafusos inferiores estão sendo solicitados a tração, porém não há alongamento do fuste devido à flexibilidade da mesa do pilar permitir que haja deformação suficiente para que não provoque alongamento dos parafusos inferiores. O mesmo ocorre na região superior, as abas da mesa do pilar e chapa de topo não oferecem resistência suficiente à rotação da ligação para que o parafuso seja efetivamente solicitado e apresente alongamento do fuste, e a alma do pilar também desenvolve deformação reduzida, fazendo com que a rotação da ligação seja determinada principalmente pelo deslocamento da chapa de topo e mesa do pilar.

Observa-se na Figura 47 que com o aumento da espessura da mesa do pilar a flexão da mesa do pilar tende a reduzir e os parafusos tendem a ser mais solicitados (apresentando maior alongamento de seu fuste) e a alma do pilar tende a deformar mais, pois a mesa do pilar transfere mais as tensões ao invés de dissipar energia deformando.

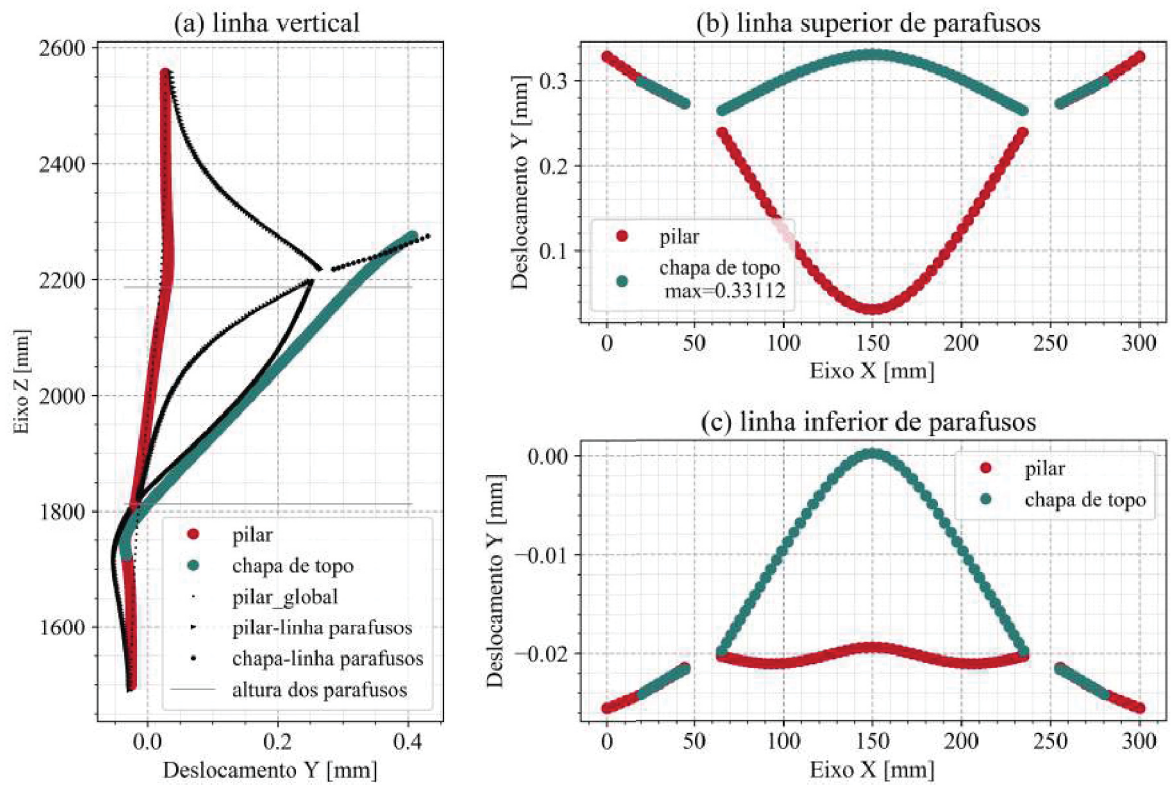


FIGURA 46 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400X87_VS500X61_4φ19_ch12+g

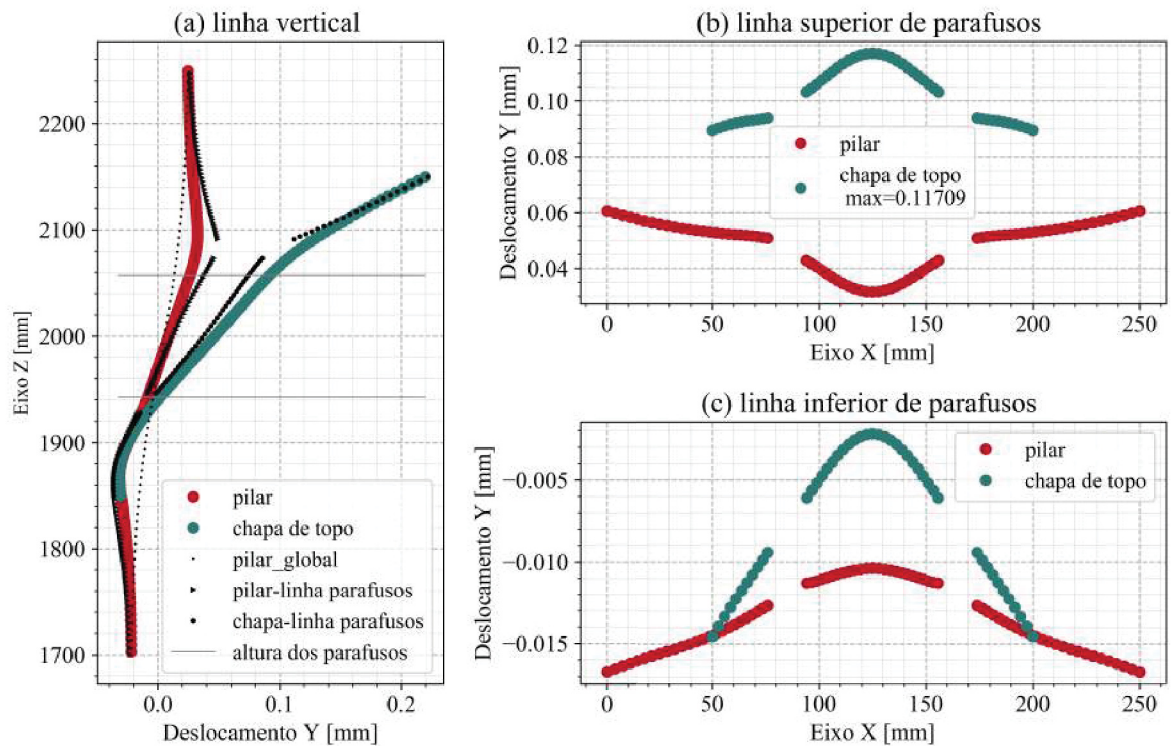


FIGURA 47 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350X118_VS250X37_4φ16_ch19

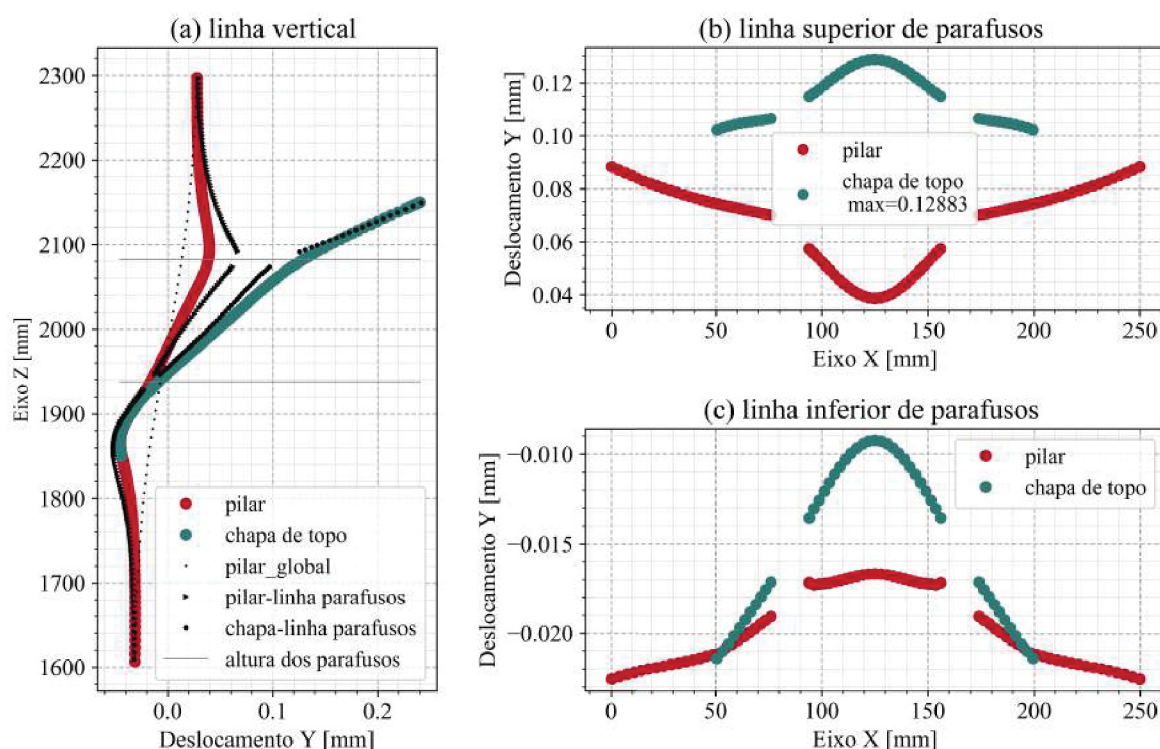


FIGURA 48 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350X98_VS250X37_4φ16_ch19

Observa-se Figura 48 (c) que a área de contato da região de compressão se inicia abaixo da linha inferior dos parafusos e o deslocamento positivo das abas da mesa interferem na região inferior, fazendo com que parte da mesa apresente deslocamento contrário à compressão aplicada pela chapa de topo.

Elementos com pequena espessura, como as mesas do pilar CVS400x87, com 12,5 mm, tendem a deslocar mais facilmente e a dissipar as tensões de tração de forma a reduzir a tensão efetiva aplicada nos parafusos e alma do pilar. Nesta ligação tanto os parafusos superiores quanto os inferiores indicam que houve tração suficiente para que o fuste dos parafusos se alongasse, mesmo com o acentuado deslocamento das abas da mesa e chapa de topo.

Observa-se na Figura 49 (a) que a alma do pilar foi mais solicitada que a da ligação CVS300x94_VS500x61_4φ19_ch19-g (Figura 49 (a)) e a mesa do pilar e chapa de topo tiveram menor deformação por flexão em relação anterior. A área de contato da região comprimida se inicia aproximadamente na linha dos parafusos inferiores, como pode-se observar na Figura 49 (c).

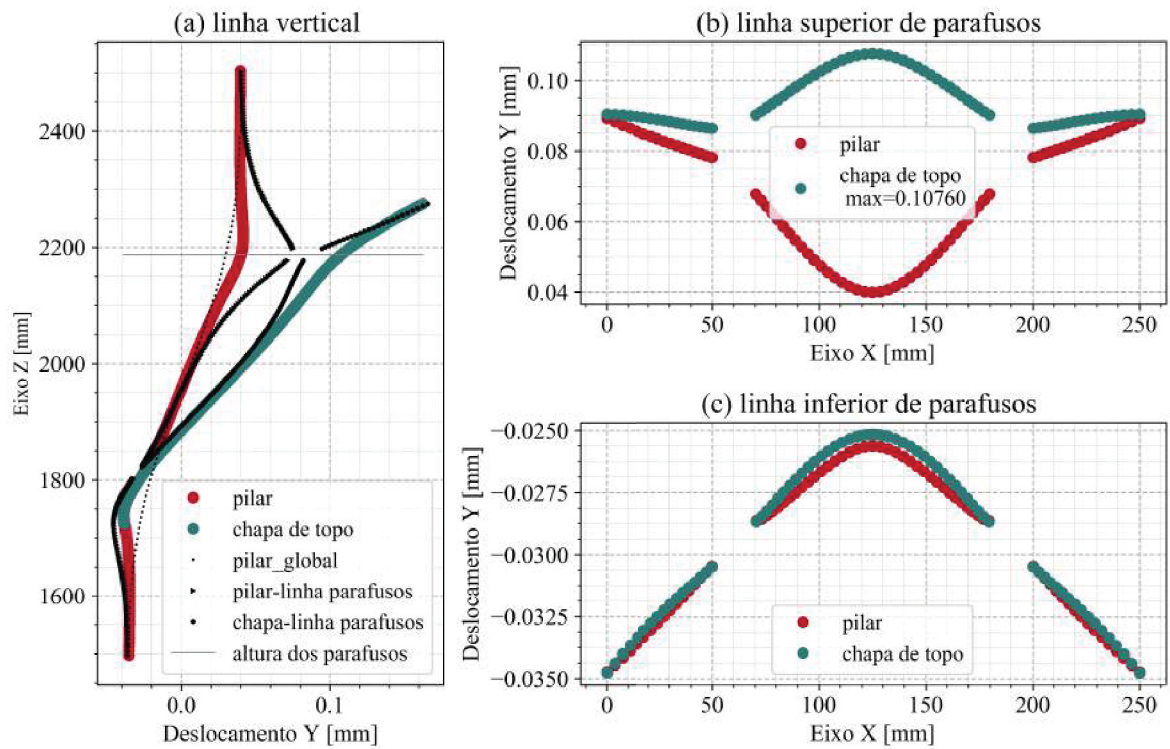


FIGURA 49 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300X94_VS500X61_4φ19_ch19-g

As figuras 50 à 55 mostram separadamente os deslocamentos que formam a rotação local da ligação.

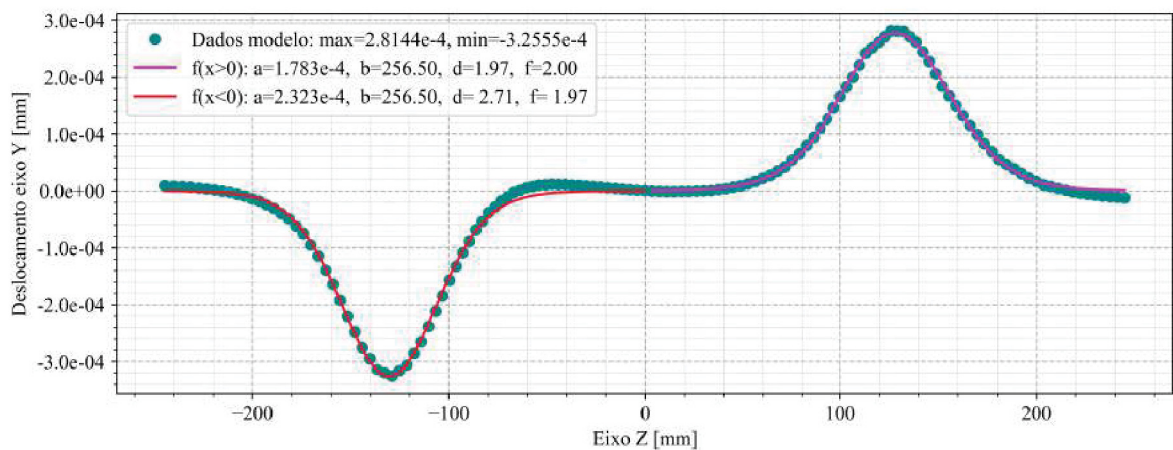


FIGURA 50 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12

A Figura 50 apresenta a deformação local da alma do pilar, a equação de aproximação e os coeficientes utilizados para a parcela negativa e positiva da equação. Este gráfico (assim como o de todas as ligações) apresenta somente a deformação local da alma, sem considerar a rotação global do pilar.

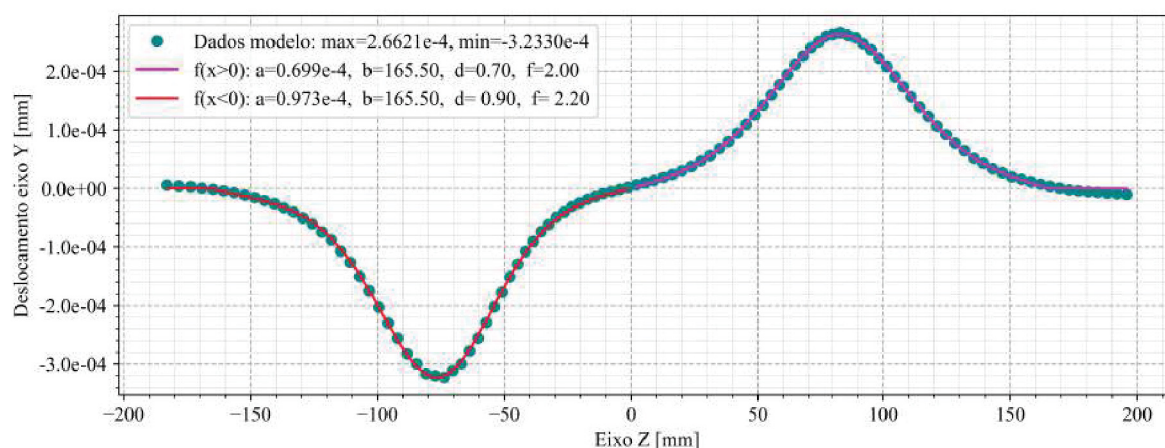


FIGURA 51 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS250x64_VS200x26_4φ16_ch15

Na Figura 51 observa-se que a deformação da alma do pilar é mais acentuada na região de compressão, e nota-se que nesta ligação a região tracionada é levemente menos alongada que a deformação por compressão.

Com o aumento da altura da viga os picos de deformação da alma do pilar se afastam e a região central do gráfico tende a ficar retilínea, como a distância entre os furos e a alma do pilar é reduzida, a região tracionada tende a ficar mais alongada, devido a concentração maior dos esforços na transmissão entre a mesa e a alma do pilar.

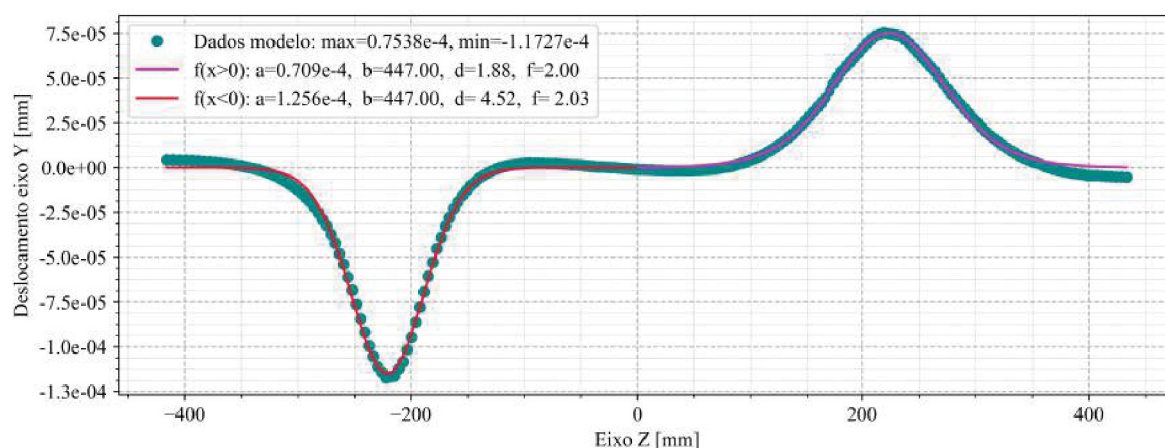


FIGURA 52 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12

A espessura da mesa do pilar também influi na concentração da deformação positiva da alma. Observa-se na Figura 52 que a deformação da alma na região tracionada está menos esbelta, em ligações com espessura da mesa maiores as mesas tendem a flexionar menos e distribuir mais as tensões na transmissão entre mesa e alma do pilar.

Em ligações com vigas de maior altura a deformação da região entre os picos tende a ser próxima a zero, fazendo com que os valores de d sejam maiores, principalmente na

região onde a deformação é mais concentrada, como pode ser observado na Figura 52, a região de compressão é mais estreita e a curvatura interna menor em relação à região tracionada, que é mais larga dispersa.

Com o aumento da rigidez à flexão da mesa do pilar a tração na alma do pilar tende a ser maior e mais concentrada, como pode ser notado na Figura 53, onde o pico positivo é mais delgado e com intensidade maior que o pico de compressão.

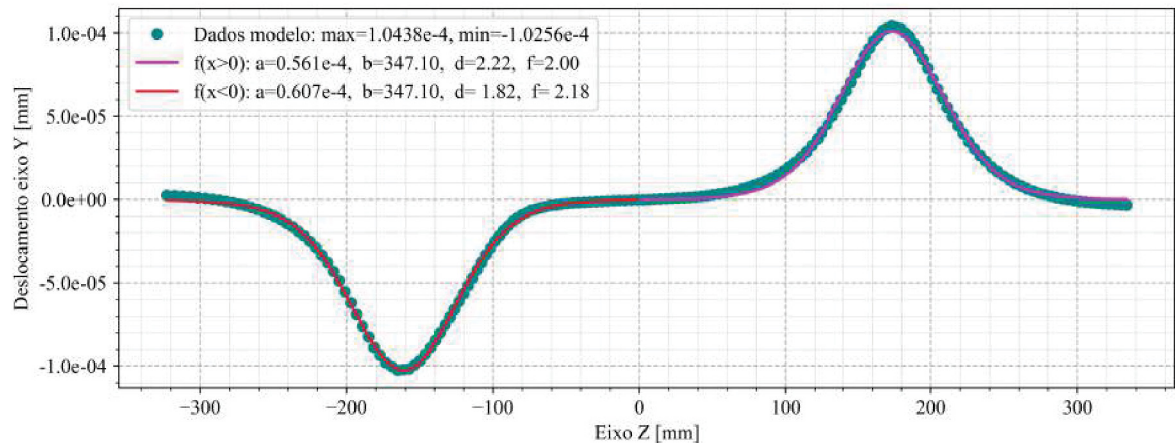


FIGURA 53 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22

Com o aumento da distância entre furos e borda superior da chapa de topo e de g , a chapa de topo deforma mais e com isso as abas externas aos furos tendem voltar em direção à sua posição indeformada (como apresentado na Figura ??), devido à delimitação de deformação imposta pelas mesas da viga.

Nas Figuras 54 e 55 estão apresentados o deslocamento isolado dos pontos na linha horizontal passando pelos parafusos superiores, a curvatura da viga idealizada para representar a mesa e chapa de topo (linha contínua no gráfico) e a carga P_{eq} (Equação 5.5) aplicada à viga para gerar a flexão igual ao deslocamento da mesa ou chapa de topo.

O ângulo de rotação da ligação é composto pela deformação da alma do pilar, flexão da mesa do pilar e chapa de topo, e o alongamento dos parafusos.

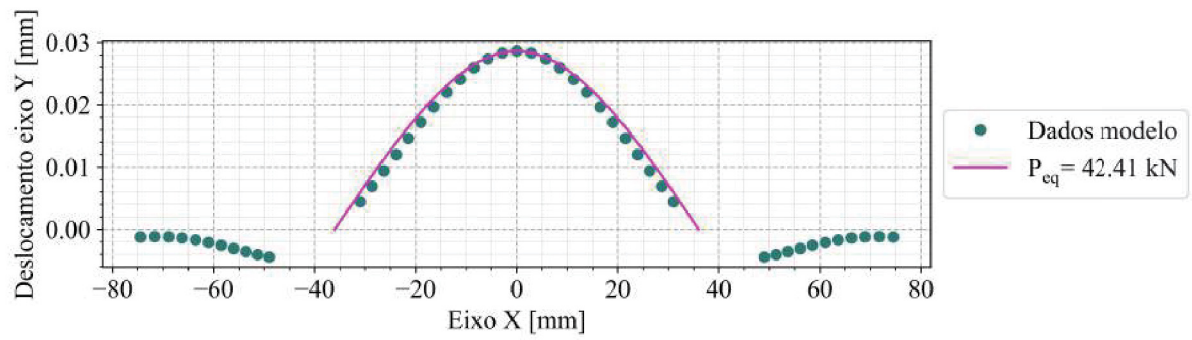


FIGURA 54 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12

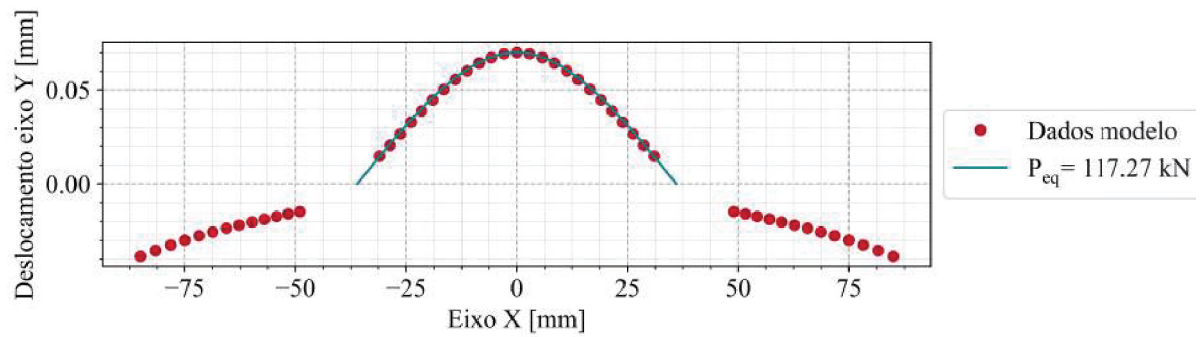


FIGURA 55 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12

6 DISCUSSÃO

A rotação da ligação é determinada principalmente pela deformação positiva e negativa da alma do pilar, pela flexão da mesa do pilar na região dos parafusos superiores, pelo alongamento dos parafusos e flexão das abas da chapa de topo na região dos parafusos superiores. A absorção de esforços de cada elemento da ligação não é dividida igualmente e depende da espessura dos elementos, da altura da viga e da distância horizontal entre parafusos.

Para o cálculo da rotação da ligação devem ser considerados apenas efeitos locais na região da ligação, portanto a rotação global do pilar não deve ser computada no cálculo da rotação da ligação, pois a rotação global do pilar ocorre em todas as ligações, incluindo ligações rígidas (engastadas) onde a rotação é teoricamente nula.

A flexão da região superior da chapa de topo e mesa do pilar podem ser estimadas através do cálculo da flexão simples de uma viga com base unitária, altura igual a espessura do elemento e comprimento proporcional à distância entre parafusos. A força aplicada para que ocorra a mesma flecha na viga idealizada e na mesa e/ou chapa de topo é proporcional ao momento aplicado na ligação e ao braço de alavanca entre parafusos e região comprimida da ligação. Em ligações feitas com o mesmo pilar, espessura da chapa de topo e distância horizontal entre parafusos (g), a força equivalente varia linearmente com a altura de alavanca. O valor desta força equivalente é diferente para a mesa do pilar e para a chapa de topo.

O cálculo da força aplicada nos parafusos deveria considerar a distância horizontal entre os furos (g), pois há considerável variação do alongamento do fuste com a variação da distância g .

A seguir estão resumidas as principais características do comportamento/reação dos elementos da ligação.

- Parafusos
 - A distância horizontal entre os parafusos deve ser considerada no cálculo do alongamento do fuste: quanto maior for a distância entre furos, menor será a tensão efetiva atuante nos parafusos;
 - O deslocamento das abas da mesa do pilar e chapa de topo influem na tensão absorvida pelos parafusos;
 - Os parafusos sofrem flexão devido ao deslocamento (inclinação) da chapa de topo e mesa do pilar, aumentando a tensão efetiva nos parafusos superiores. A inclinação da cabeça do parafuso e porca é diferente uma da outra, normalmente a inclinação na extremidade em contato com o pilar é maior, sendo assim, a

região onde há tensões mais altas em parte do fuste do parafuso é próximo à extremidade na direção do pilar;

- A tensão nos parafusos varia de acordo com a altura da viga (proporcional ao braço de alavanca), com a rigidez à flexão (espessura) da mesa do pilar e chapa de topo e com a distância horizontal dos furos. Em geral quanto mais espessos forem a mesa do pilar e chapa de topo e menor a distância horizontal entre parafusos, maior será a força efetiva atuante no parafuso;
 - A linha inferior de parafusos sofre tração parcial ou total do fuste, com intensidade dependente das dimensões dos elementos da ligação. Em ligações com elementos mais espessos (chapa de topo e mesa do pilar) a tendência de ocorrer tração nos parafusos inferiores é maior.
- Alma do pilar
 - A alma do pilar apresenta deformação considerável tanto na região comprimida quanto na região tracionada, porém em ligações com g maiores a tensão na alma do pilar é reduzida devido ao deslocamento da mesa dissipar maior parte da tensão;
 - A alma do pilar apresenta deformação positiva e negativa, com perfil de deformação não simétrico, que pode ser descrito por uma função trigonométrica exponencial com constantes distintas para as regiões comprimida e tracionada da alma de cada ligação.
- Mesa do pilar
 - A mesa do pilar sofre flexão positiva devido à solicitação transmitida pelos parafusos superiores e sofre flexão negativa pela pressão de contato da parte inferior da chapa de topo;
 - A rigidez das abas da mesa do pilar tem papel importante na distribuição de esforços entre os elementos da ligação. Em ligações com mesas do pilar mais espessas a tensão positiva transmitida para a alma do pilar tende a ser maior e mais concentrada, e os parafusos tendem a apresentar maior alongamento do fuste. Em perfis com mesas mais finas a propensão é de que haja maior deslocamento das abas da mesa do pilar, ocasionando maior dissipação de tensões na mesa e menor transmissão de esforços para a alma do pilar. Os parafusos tendem a apresentar menor alongamento do fuste;
 - Em perfis com espessura da mesa reduzida há tendência de desenvolvimento de rótulas plásticas na região dos parafusos tracionados.
- Chapa de topo

- A chapa de topo tende a apresentar deslocamentos menores que a mesa do pilar, pois a ligação entre chapa e viga restringe o deslocamento da chapa de topo;
 - A chapa de topo tende a desenvolver rótulas plásticas na região dos parafusos superiores, dependendo da espessura deste elemento.
- Viga
 - As mesas da viga, na interseção entre viga e chapa de topo, sofrem flambagem devido à concentração de esforços e à deformação da chapa de topo (o que provoca inclinação da seção transversal das mesas da viga).

7 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi a análise de ligações metálicas parafusadas com chapa de topo não estendida, através de simulação numérica com auxílio do software ANSYS Workbench, para a determinação da rigidez rotacional da ligação e a verificação da influência de cada elemento na rotação angular da ligação. As ligações analisadas tiveram variação nas dimensões dos elementos da ligação (seção da viga e do pilar, espessura da chapa de topo e diâmetro dos parafusos) com intuito de verificar e descrever o comportamento de cada elemento e sua influência na rigidez rotacional.

A capacidade mecânica das ligações foi verificada segundo a norma Eurocode-3 (2005). Também foi feito o cálculo da semirrígidez das ligações pela metodologia apresentada no anexo J desta mesma norma, obtendo-se a rigidez e a capacidade resistente de cada ligação.

A rigidez rotacional é dependente de aspectos geométricos e mecânicos da ligação. Em ligações metálicas parafusadas as dimensões dos elementos da ligação e a disposição dos parafusos são as principais características que determinam a rigidez desta ligação; são elas que definem, como um conjunto, como será a distribuição de tensões e a deformação de cada elemento.

O parafuso é responsável pela transferência de esforços entre a chapa de topo e a mesa do pilar, porém o alongamento do fuste do parafuso não é linearmente proporcional à distância entre a região comprimida e os furos superiores (comprimento de alavanca da ligação). A rigidez à flexão da chapa de topo e mesa do pilar, e a distância horizontal entre os furos são fatores que alteram o carregamento dos parafusos tracionados. Quanto mais rígidas (espessas) forem a chapa de topo e a mesa do pilar e/ou menor for a distância horizontal entre furos, maior será a tensão efetiva atuante no parafuso, por consequência o alongamento dos parafusos terá parcela maior na abertura angular da ligação. Além disso é necessária considerar o efeito localizado provocado pela flexão do parafuso causada pelo deslocamento das abas da mesa do pilar e chapa de topo, acarretando em aumento de tensões em parte do fuste do parafuso.

A região tracionada da mesa do pilar e chapa de topo são flexionadas durante o carregamento da ligação. O deslocamento destes elementos, na linha horizontal superior dos furos, pode ser representado pela equação da linha neutra de uma viga bi-apoiada com comprimento igual à distância horizontal entre parafusos menos meio diâmetro do parafuso e seção transversal com altura igual à espessura do elemento, com base unitária.

A alma do pilar é carregada axialmente e apresenta deformação tanto positiva quanto negativa, com perfil de deformação não uniforme e assimétrico que pode ser descrito por uma função trigonométrica exponencial. A intensidade da solicitação da alma é influenciada pela rigidez da mesa do pilar: em perfis com mesa mais fina a tensão transmitida para a

alma é menor e mais distribuída, enquanto em ligações com perfis mais robustos (com mesa mais espessa) há tendência das abas da mesa deslocarem menos e transmitirem tensões de intensidade à alma, ocasionando deformações maiores e mais concentradas.

O cálculo da rotação da ligação deve considerar apenas os efeitos locais na região da ligação, portanto a rotação global do pilar não deve ser computada no cálculo da rotação da ligação, uma vez que o pilar apresenta rotação global em todos os tipos de ligações, incluindo ligações rígidas onde teoricamente não há rotação angular.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 5884 - Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

ANSYS, I. **Ansys Help**. 2014.

AVAKIAN, A. C. **Estruturas Aporticadas Mistas Aço-Concreto: Avaliação De Metodologias De Análise**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

BARBOSA, G. D. **Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul,, 2006.

BERGAMASCO, P. D. A. **Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos-EESC/USP.

BORGSMILLER, J. T. **Simplified method for design of moment end-plate connections**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Virginia Polytechnic Institute and state University, Virgínia, 1995.

CALADO, R. M. T. **Estudo e Concepção de Molas em Y**. 2011.

CHEN WAI-FAH; GOTO, Y. L. J. Y. R. **Stability design of semi-rigid frames**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1995.

DESSOUKI ABDELRAHIM KHALIL ; YOUSSEF, A. H. . I. M. M. Behavior of i-beam bolted extended end-plate moment connections. **Ain Shams Engineering Journal**, n. 4, p. 685–699, 2013.

BS EN 1993-1-8 2005: Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-8: Design of joints, v. 29.

HENDRICK D. KULRETI, A. R. M. T. research report FSEL/MBMA 84-02, **Analytical and EXperimental Investigation of Stiffened Flush End-Place Connections with Four-Bolts at the Tension Flange**. 1984.

HENDRICK D.; KULRETI, A. R. M. T. research report FSEL/MBMA 85-01, **Unification of Flush End-Plate Design Procedures**. 1985.

KAMESHKI, E. S.; SAKA, M. P. Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm. **Computers and Structures**, v. 79, p. 1593–1604, 2001.

- KIM, S.-e.; CHOI, S.-H. Practical advanced analysis for semi-rigid space frames. **International Journal of Solids and Structures**, v. 38, p. 9111–9131, 2001. ISSN 8223408333.
- KUKRETI, A. R.; ZHOU, F.-F. Eight-bolt endplate connection and its influence on frame behavior. **Engineering Structures**, v. 6, n. 28, p. 1483 – 1493, 2005.
- MAGGY, Y. I. **Análise Numérica, via M.E.F., do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Coluna Com Chapa De Topo**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Escola de Engenharia de São Carlos- EESC/USP, São Carlos, 2000.
- MAGGY, Y. I. **Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida**. Tese (Tese de Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos- EESC/USP, 2004.
- NEVVILLE, M. et al. **LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python**. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.11813>>.
- PFEIL WALTER; PFEIL, M. **Estruturas de aço, dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2009.
- RIBEIRO, L. L. F. **Estudo Do Comportamento Estrutural De Ligações Parafusadas Viga-Coluna Com Chapa De Topo:Análise Teórico-Experimental**. Tese (Tese de Doutorado.) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
- ROMANO, V. P. **Dimensionamento de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo: Modelo do Eurocode 3**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.
- SEGUI, W. T. **Steel Design**. Stanford: Editora Campus, 2013.
- SOUZA, M. L. d. **Análise De Estruturas De Aço Com Ligações Semi-Rígidas Em Teoria De 2ª Ordem**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de engenharia de estruturas, Belo Horizonte, 1999.
- SROUJI, R. research report FSEL/MBMA 83-05, **Yield-Line Analysis of End-Plate Connections with Bolt Predictions**. 1983.
- SROUJI, R. research report FSEL/MBMA 83-05, **Yield-Line Analysis of End-Plate Connections with Bolt Predictions – Addendum**. 1984.
- WU FU-HSIANG; CHEN, W.-f. A design model for semi- rigid connections. **School of Civil Engineering, Purdue University**, v. 12, p. 88–97, 1990.
- ZANONI, T. Trabalho Final de Curso, **Determinação Da Rigidez De Ligações Metálicas Parafusadas Viga-Pilar Com Chapa De Topo**. 2015.

Appendices

A TABELAS RESUMO

TABELA 6 – Dimensões dos perfis das ligações

Ligação	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}	g
CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	170	12,5	8	140	6,3	4,75	80
CVS250x64_VS200x26_4fi16_ch15	170	16	12,5	130	9,5	4,75	70
CVS250x64_VS300x26_4fi16_ch15	170	16	12,5	120	8	4,75	60
CVS300x100_VS250x37_4fi16_ch15	250	19	12,5	130	12,5	6,3	86
CVS300x47_VS150x19_4fi12_ch9	200	9,5	8	100	8	6,3	55
CVS300x67_VS200x26_4fi16_ch15	200	16	8	130	9,5	4,75	70
CVS300x67_VS250x37_4fi16_ch15	200	16	8	130	12,5	6,3	86
CVS300x83_VS300x37_4fi16_ch15	250	16	9,5	180	9,5	4,75	120
CVS300x83_VS500X61_4fi19_ch19	250	16	9,5	250	9,5	6,3	170
CVS300x94_VS450X51_4fi19_ch12	250	19	9,5	200	9,5	6,3	150
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch12	250	19	9,5	250	9,5	6,3	170
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19	250	19	9,5	250	9,5	6,3	170
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19-g	250	19	9,5	250	9,5	6,3	130
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch15	250	19	12,5	130	12,5	6,3	86
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19	250	19	12,5	130	12,5	6,3	86
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19+g	250	19	12,5	130	12,5	6,3	96
CVS350x105_VS250x37_4fi19_ch19	250	19	12,5	130	12,5	6,3	86
CVS350x105_VS300x37_4fi16_ch19	250	19	12,5	180	9,5	4,75	115
CVS350x118_VS250x37_4fi16_ch19	250	22,4	12,5	130	12,5	6,3	86
CVS350x118_VS400x35_4fi19_ch22	250	22,4	12,5	140	9,5	4,75	70
CVS350x118_VS450x71_4fi19_ch22	250	22,4	12,5	200	16	6,3	145
CVS350x98_VS250x37_4fi16_ch19	250	19	9,5	130	12,5	6,3	86
CVS400x87_VS250x32_4fi16_ch12	300	12,5	9,5	160	9,5	4,75	100
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12	300	12,5	9,5	180	12,5	4,75	91,5

Continua na página seguinte

TABELA 6 – Dimensões dos perfis das ligações

Ligação	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}	g
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12-g	300	12,5	9,5	180	12,5	4,75	100
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12	300	12,5	9,5	200	12,5	4,75	120
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12+g	300	12,5	9,5	200	12,5	4,75	155
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12-g	300	12,5	9,5	200	12,5	4,75	100
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12	300	12,5	9,5	200	9,5	4,75	120
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12-g	300	12,5	9,5	200	9,5	4,75	100
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12	300	12,5	9,5	200	9,5	6,3	120
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12+g	300	12,5	9,5	200	9,5	6,3	152,5
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12	300	12,5	9,5	250	9,5	6,3	120
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12+g	300	12,5	9,5	250	9,5	6,3	190
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12-g	300	12,5	9,5	250	9,5	6,3	100

Dimensões em milímetros

TABELA 7 – Coeficientes da equação de aproximação da deformação da alma do pilar

Ligação	b	$a^+[10^{-4}]$	$d^{(+)}$	$a^- [10^{-4}]$	$d^{(-)}$	$f^{(-)}$
CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	256,5	1,784	1,970	2,323	2,71	1,97
CVS250x64_VS200x26_4fi16_ch15	165,5	0,699	0,697	0,972	0,90	2,20
CVS250x64_VS300x26_4fi16_ch15	250,91	0,695	2,230	0,808	2,35	1,95
CVS300x100_VS250x37_4fi16	215,5	0,771	0,622	1,035	0,94	2,11
CVS300x47_VS150x19_4fi12_ch9	122,35	1,507	0,646	2,360	1,20	2,23
CVS300x67_VS200x26_4fi16_ch15	166,5	1,714	0,500	2,216	0,68	2,19
CVS300x67_VS250x37_4fi16_ch15	215,5	1,591	0,839	2,226	1,23	2,13
CVS300x83_VS300x37_4fi16_ch15	263,17	0,890	0,900	1,562	2,20	2,02
CVS300x83_VS500X61_4fi19_ch12	447	0,719	1,884	1,329	5,17	2,02
CVS300x94_VS450X51_4fi19_ch12	397	0,755	1,612	1,360	4,09	2,04
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch12	447	0,000	1,892	0,000	5,15	2,02

Continua na página seguinte

TABELA 7 – Coeficientes da equação de aproximação da deformação da alma do pilar

Ligação	b	$a^+ [10^{-4}]$	$d^{(+)}$	$a^- [10^{-4}]$	$d^{(-)}$	$f^{(-)}$
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19	447	0,713	1,845	1,258	4,55	2,02
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19-g	447	0,807	2,403	1,151	3,84	2,08
CVS350x105_VS250x37_4fi16	215,5	0,548	0,884	0,721	0,95	2,03
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch15	215,5	0,557	0,840	0,833	1,18	2,18
CVS350x105_VS250x37_4fi16_g	215,5	0,491	0,649	0,812	1,17	2,12
CVS350x105_VS250x37_4fi19_ch19	217	0,554	0,856	0,802	1,08	2,20
CVS350x105_VS300x37_4fi16_g+50	262,5	0,446	0,924	0,773	1,80	2,04
CVS350x118_VS250x37_4fi16	215,5	0,512	0,628	0,709	0,86	2,15
CVS350x118_VS400x35_4fi19_ch22	347,1	0,561	2,219	0,607	1,82	2,18
CVS350x118_VS450x71_4fi19_ch22	397	0,390	1,586	0,654	2,94	2,07
CVS350x98_VS250x37_4fi16	215,5	0,993	0,650	1,365	0,95	2,12
CVS400x87_VS250x32_4fi16_ch12	217	1,076	0,962	1,998	2,18	2,12
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12	267	0,000	0,885	0,000	0,95	2,03
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12+g	315,5	0,803	1,145	1,967	5,06	2,00
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12		0,803	1,145	1,926	5,06	2,00
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12+g	417	0,837	2,302	1,876	8,48	2,05
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12	417	0,993	3,207	1,745	7,27	2,09
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12+g	467	0,708	2,185	1,916	11,24	2,01
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12	467	0,962	4,051	1,689	8,67	2,09

TABELA 8 – P equivalente

Ligação	h_2	$\frac{g}{2}$	$P_{eq} [kN]$		$P_{cal} [kN]$
			chapa	mesa	
CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	288,5	40	42,41	117,27	34,66
CVS250x64_VS200x26_4fi16_ch15	192,5	35	156,38	226,08	51,95
CVS250x64_VS300x26_4fi16_ch15	272,91	30	135,26	174,35	36,64
CVS300x100_VS250x37_4fi16	247,5	40	63,49	148,94	40,40

Continua na página seguinte

TABELA 8 – P equivalente

Ligação	h_2	$\frac{g}{2}$	$P_{eq} [kN]$		$P_{cal} [kN]$
			chapa	mesa	
CVS300x47_VS150x19_4fi12_ch9	143,85	27,5	108,96	122,46	17,38
CVS300x67_VS200x26_4fi16_ch15	193,5	35	156,63	216,22	51,68
CVS300x67_VS250x37_4fi16_ch15	247,5	40	59,16	150,05	40,40
CVS300x83_VS300x37_4fi16_ch15	315,17	60	41,91	75,24	31,73
CVS300x83_VS500X61_4fi19_ch12	522,5	85	4,30	22,05	19,14
CVS300x94_VS450X51_4fi19_ch12	462,5	75	14,66	42,57	21,62
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch12	522,5	85	13,88	33,20	19,14
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19	522,5	85	17,09	33,12	19,14
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19-g	502,5	65	24,19	41,42	19,90
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch15	247,5	40	93,19	142,27	40,40
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19	247,5	40	94,38	138,18	40,40
CVS350x105_VS250x37_4fi16_g	255,5	48	82,61	119,22	39,14
CVS350x105_VS250x37_4fi19_ch19	247,5	40	100,54	147,19	40,40
CVS350x105_VS300x37_4fi16_g+50	312	57,5	46,26	82,50	32,05
CVS350x118_VS250x37_4fi16_ch19	247,5	40	108,84	147,02	40,40
CVS350x118_VS400x35_4fi19_ch22	372,6	35	107,38	114,49	26,84
CVS350x118_VS450x71_4fi19_ch22	463	75,5	22,64	25,26	21,60
CVS350x98_VS250x37_4fi16	247,5	40	26,79	100,83	40,40
CVS400x87_VS250x32_4fi16_ch12	258	50	54,62	96,64	38,76
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12	319	60	26,77	67,41	31,35
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12-g	309	50	34,73	79,82	32,36
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12	367,5	60	19,61	56,30	27,21
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12+g	385	77,5	12,54	44,15	25,97
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12-g	357,5	50	27,52	66,55	27,97
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12	412	60	20,38	49,20	24,27

Continua na página seguinte

TABELA 8 – P equivalente

Ligação	h_2	$\frac{g}{2}$	$P_{eq} [kN]$		$P_{cal} [kN]$
			chapa	mesa	
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12-g	402	50	28,48	59,03	24,88
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12	467,5	60	18,18	42,46	21,39
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12+g	482,5	75	13,53	36,40	20,73
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12	517,5	60	15,54	37,38	19,32
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12+g	552,5	95	6,22	23,97	18,10
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12-g	507,5	50	20,71	44,55	19,70

Dimensões em milímetros

TABELA 9 – Semirrigidez das ligações pelo método Eurocode-3 (2005) e Modelo 3D

Ligação	$P_{máx}$	Eurocode	Modelo 3D	
	$[kN]$	$S_j [kN.m]$	$\theta_{local} [rad]$	$S_j [\frac{kN.m}{rad}]$
CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	11,588	239,661	1,5413E-06	765462,54
CVS250x64_VS200x26_4fi16_ch15	7,081	124,411	2,2127E-05	451933,84
CVS250x64_VS300x26_4fi16_ch15	11,751	1180	1,2369E-05	808481,33
CVS300x100_VS250x37_4fi16_ch19	9,399	129,173	1,3033E-05	767278,29
CVS300x47_VS150x19_4fi12_ch9	3,624	55,756	2,9861E-05	334884,35
CVS300x67_VS200x26_4fi16_ch15	7,081	112,938	2,5262E-05	395845,55
CVS300x67_VS250x37_4fi16_ch15	9,339	74,855	1,7105E-05	584609,07
CVS300x83_VS300x37_4fi16_ch15	11,716	209,468	1,5200E-05	657894,73
CVS300x83_VS500X61_4fi19_ch12	28,288	1197	5,5874E-06	1789731,76
CVS300x94_VS450X51_4fi19_ch12	24,71	1824	7,9226E-06	1262213,92
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch12	28,288	2358	8,4797E-06	1179281,71
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19	28,288	2350	5,6030E-06	1784761,66
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19-g	28,288	6910	3,7578E-06	2661134,46
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch15	9,329	244,794	1,2429E-05	804546,62

Continua na página seguinte

TABELA 9 – Semirrigidez das ligações pelo método Eurocode-3 (2005) e Modelo 3D

Ligação	$P_{m\acute{a}x}$	Eurocode	Modelo 3D	
	[kN]	S_j [kN.m]	θ_{local} [rad]	$S_j[\frac{kN.m}{rad}]$
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19	9,329	380,097	1,0793E-05	926511,98
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19+g	9,329	235,326	1,4332E-05	697745,11
CVS350x105_VS250x37_4fi19_ch19	13,156	793,475	1,1906E-05	839935,05
CVS350x105_VS300x37_4fi16_ch19	11,716	399,81	3,3682E-06	2968961,75
CVS350x118_VS250x37_4fi16_ch19	11,716	481,637	1,0809E-05	925133,82
CVS350x118_VS400x35_4fi19_ch22	21,752	10280	3,4182E-06	2925514,62
CVS350x118_VS450x71_4fi19_ch22	24,808	3336	4,4317E-06	2256495,04
CVS350x98_VS250x37_4fi16_ch19	9,329	316,846	1,3488E-05	741389,15
CVS400x87_VS250x32_4fi16_ch12	9,399	63,81	2,7372E-05	365343,04
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12	11,647	97,806	2,2223E-05	449979,89
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12-g	11,647	157,621	1,7150E-05	583086,93
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12	13,976	204,295	1,4937E-05	669475,42
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12+g	13,976	108,24	2,2162E-05	451218,43
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12-g	13,976	328,974	1,1490E-05	870288,84
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12	16,352	359,016	1,1793E-05	847946,03
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12-g	16,352	578,463	9,4275E-06	1060723,72
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12	23,671	1031	8,3974E-06	1190841,96
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12+g	21,542	489,957	1,3231E-05	755806,98
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12	26,621	1681	6,5574E-06	1524985,74
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12+g	22,235	383,296	1,3222E-05	756297,46
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12-g	26,362	2656	4,7554E-06	2102874,11

TABELA 10 – Rotação global teórica do pilar com ligação engastada e rotação global do pilar obtida no Modelo tridimensional, em radianos

Ligação	$I_{pilar} [cm^4]$	$\theta_{teórico}$	θ_{3D}	$\frac{\theta_{3D}}{\theta_{teórico}}$
CVS250x47_VS300x25_4fi16_ch12	6758	$1,8497 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^{-6}$	2,781%
CVS250x64_VS200x26_4fi16_ch15	8538	$1,4640 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-6}$	3,522%
CVS250x64_VS300x26_4fi16_ch15	8538	$1,4640 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-6}$	1,879%
CVS300x100_VS250x37_4fi16_ch19	20655	$6,0518 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-6}$	4,599%
CVS300x47_VS150x19_4fi12_ch9	9499	$6,3165 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$	5,134%
CVS300x67_VS200x26_4fi16_ch15	14202	$8,8016 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-6}$	4,989%
CVS300x67_VS250x37_4fi16_ch15	14202	$8,8016 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-6}$	4,584%
CVS300x83_VS300x37_4fi16_ch15	17672	$7,0733 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	4,460%
CVS300x83_VS500X61_4fi19_ch12	17672	$7,0733 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	3,381%
CVS300x94_VS450X51_4fi19_ch12	20206	$6,1863 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-6}$	4,160%
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch12	20206	$6,1863 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$	3,941%
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19	20206	$6,1863 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	3,847%
CVS300x94_VS500X61_4fi19_ch19-g	20206	$6,1863 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-6}$	3,964%
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch15	29213	$4,2789 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-6}$	6,473%
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19	29213	$4,2789 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	4,684%
CVS350x105_VS250x37_4fi16_ch19+g	29213	$4,2789 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	4,541%
CVS350x105_VS250x37_4fi19_ch19	29213	$4,2789 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-6}$	6,418%
CVS350x105_VS300x37_4fi16_ch19	29213	$4,2789 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	4,494%
CVS350x118_VS250x37_4fi16_ch19	33058	$3,7812 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-6}$	6,974%
CVS350x118_VS400x35_4fi19_ch22	33058	$3,7812 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	4,531%
CVS350x118_VS450x71_4fi19_ch22	33058	$3,7812 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$	4,046%
CVS350x98_VS250x37_4fi16_ch19	28454	$4,3931 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$	5,553%
CVS400x87_VS250x32_4fi16_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	5,150%
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-6}$	4,853%
CVS400x87_VS300x46_4fi16_ch12-g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-6}$	4,853%
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	4,790%

Continua na página seguinte

TABELA 10 – Rotação global teórica do pilar com ligação engastada e rotação global do pilar obtida no Modelo tridimensional, em radianos

Ligação	$I_{pilar} [cm^4]$	$\theta_{teórico}$	θ_{3D}	$\frac{\theta_{3D}}{\theta_{teórico}}$
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12+g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	4,563%
CVS400x87_VS350x51_4fi16_ch12-g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-6}$	4,642%
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	4,422%
CVS400x87_VS400x44_4fi16_ch12-g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-6}$	4,505%
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	4,302%
CVS400x87_VS450X51_4fi19_ch12+g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$	4,052%
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$	3,967%
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12+g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	3,698%
CVS400x87_VS500X61_4fi19_ch12-g	32339	$3,8653 \cdot 10^{-5}$	$1,868 \cdot 10^{-6}$	4,832%

B GRÁFICOS DOS RESULTADOS

B.1 Ligações Feitas com pilares de 250 milímetros de altura

CVS250x64_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

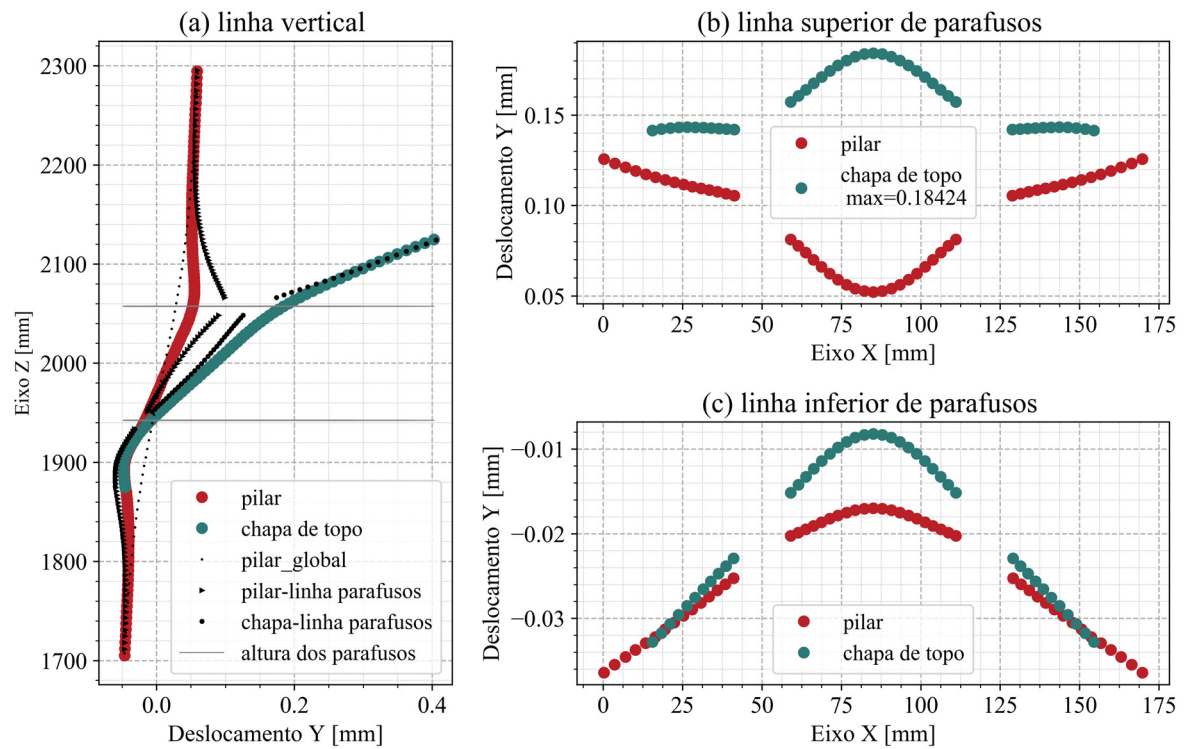


FIGURA 56 – Deslocamento total dos pontos das linhas vertical e da linhas horizontais na altura dos parafusos da ligação CVS250x64_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

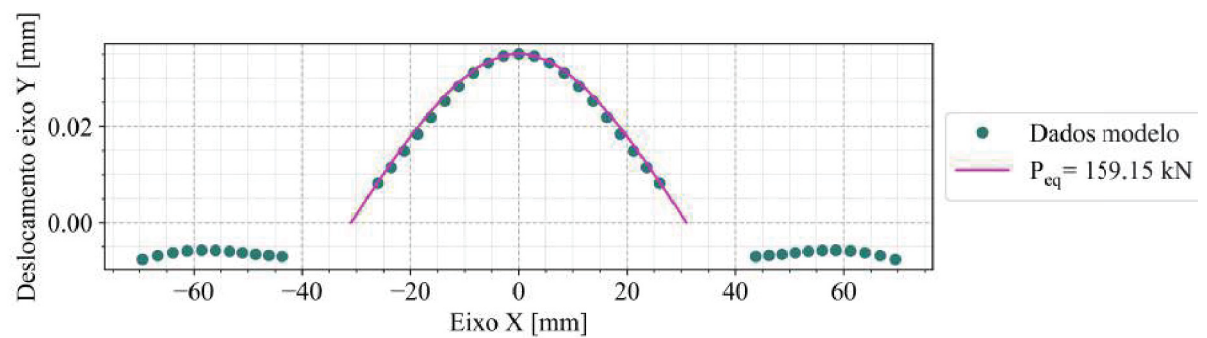


FIGURA 57 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal dos parafusos superior de parafusos, ligação CVS250x64_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

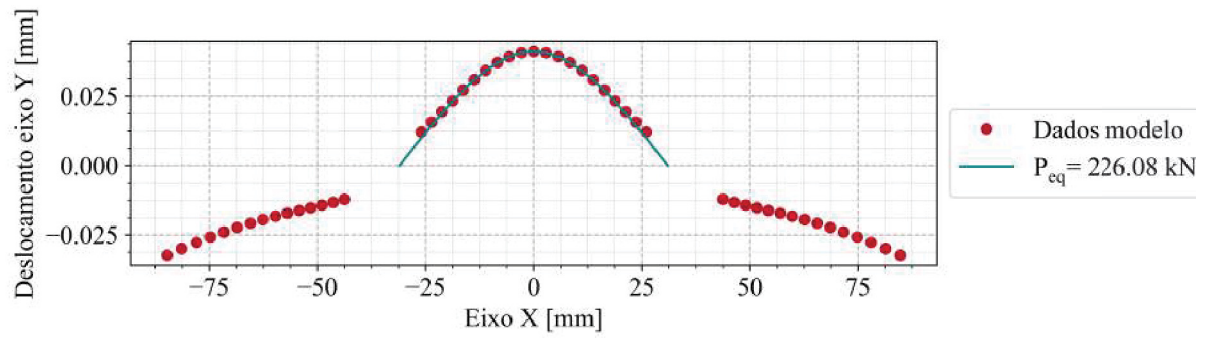


FIGURA 58 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal dos parafusos superior de parafusos, ligação CVS250x64_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

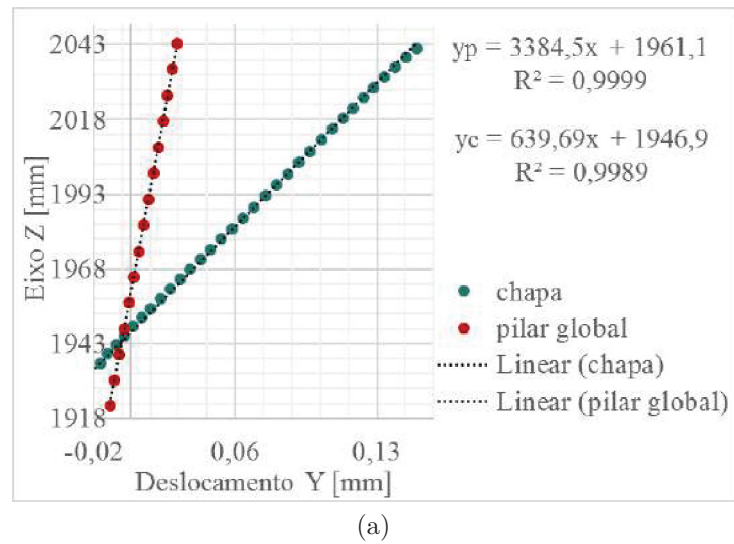


FIGURA 59 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS250x64_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15

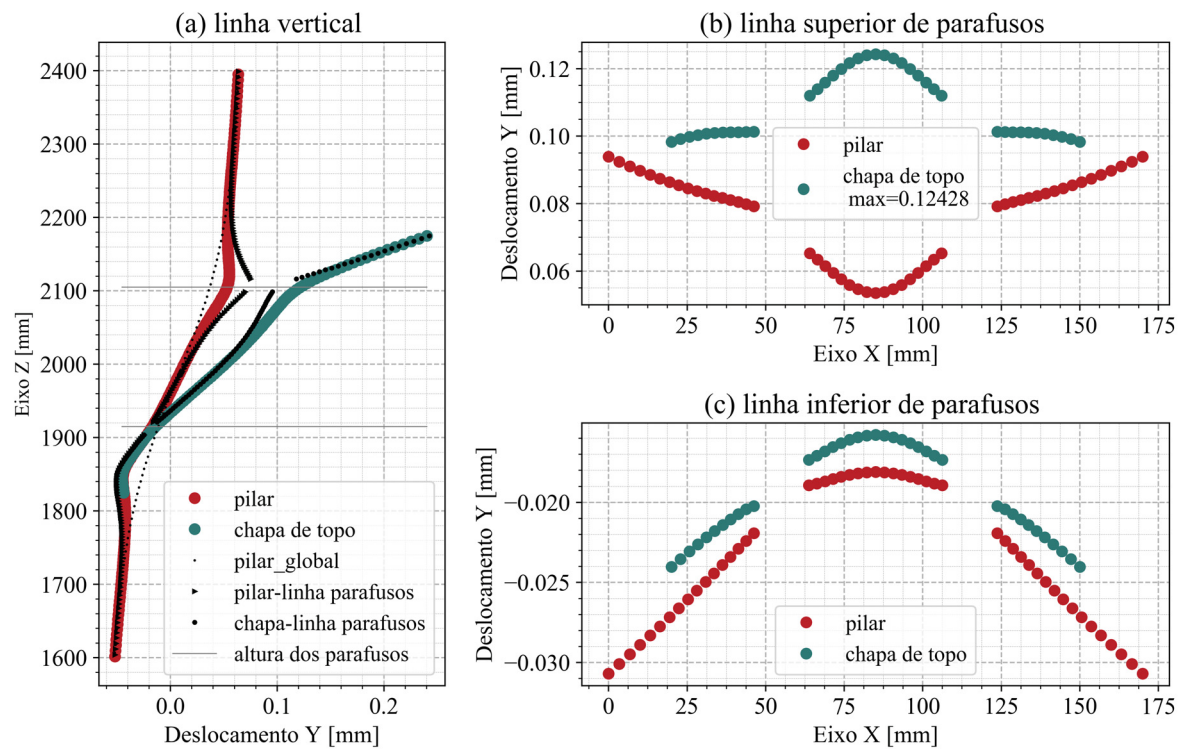


FIGURA 60 – Deslocamento total dos pontos das linhas vertical e da linhas horizontais na altura dos parafusos da ligação CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15

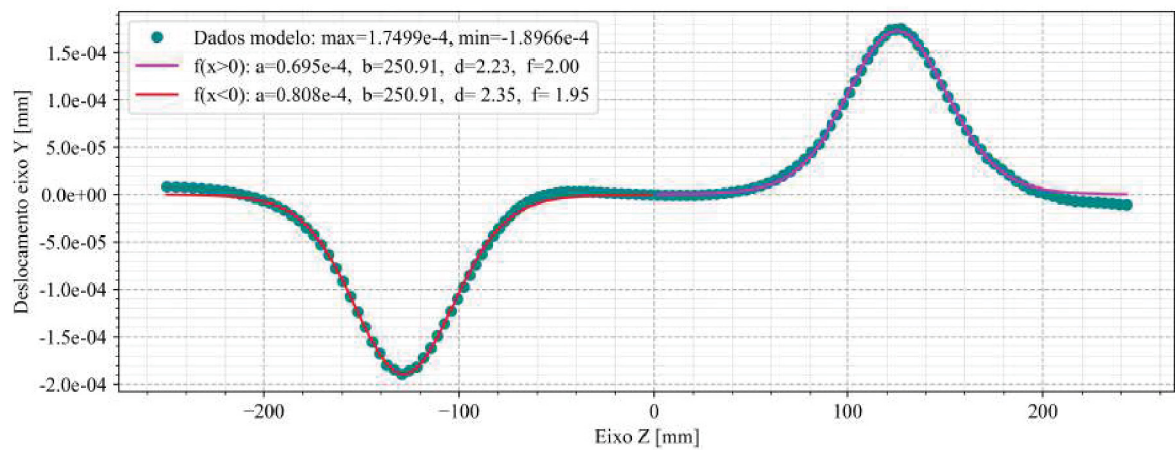


FIGURA 61 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS250x64_VS300x26_4φ16_ch15

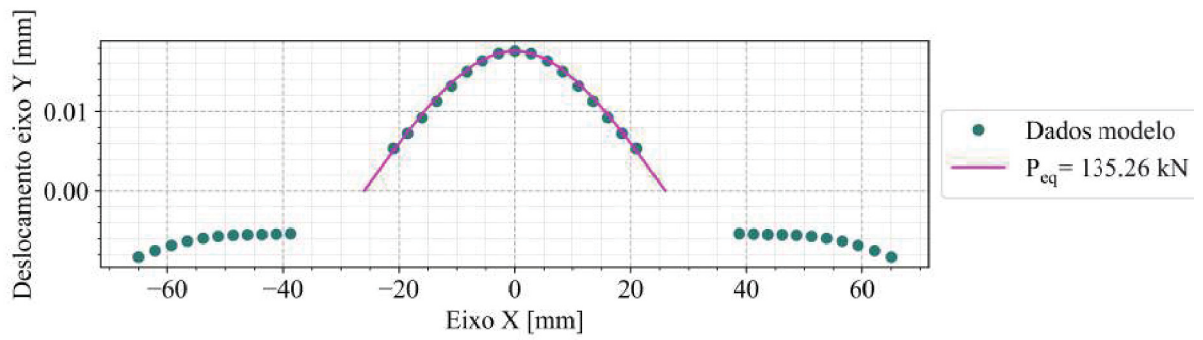


FIGURA 62 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x64_VS300x26_4 ϕ 16_ch15

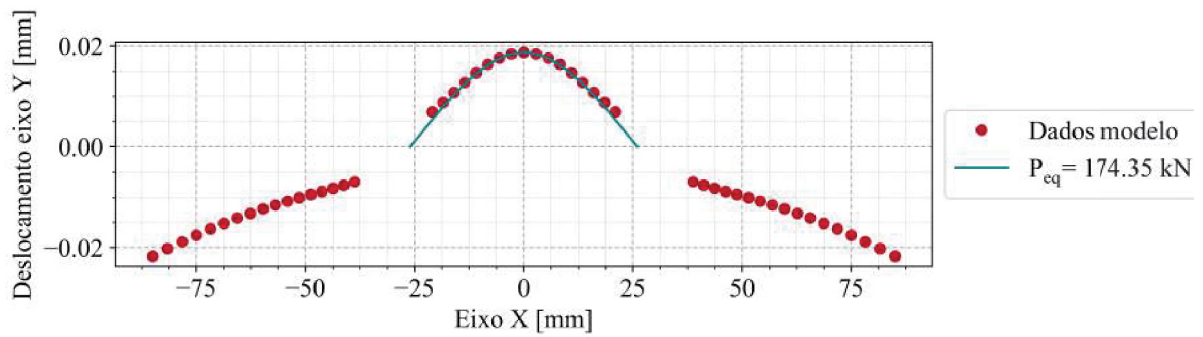


FIGURA 63 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS250x64_VS300x26_4 ϕ 16_ch15

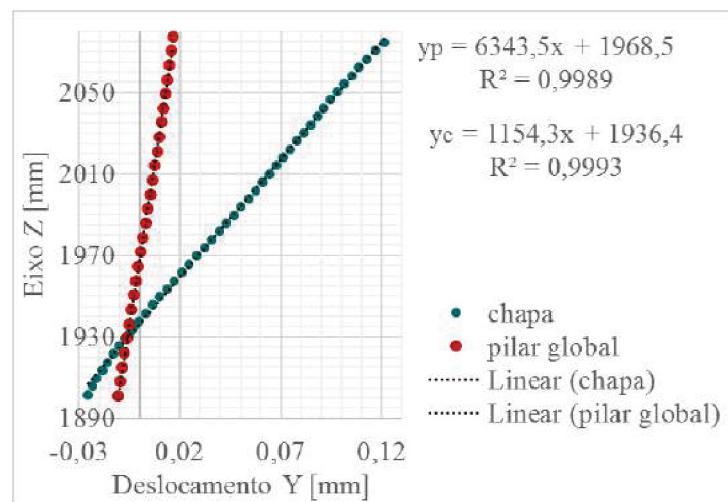


FIGURA 64 – Rotação da chapa de topo, pilar global e linhas de tendência lineares, ligação CVS250x64_VS300x26_4 ϕ 16_ch15

B.2 Ligações Feitas com pilares de 300 milímetros de altura

CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

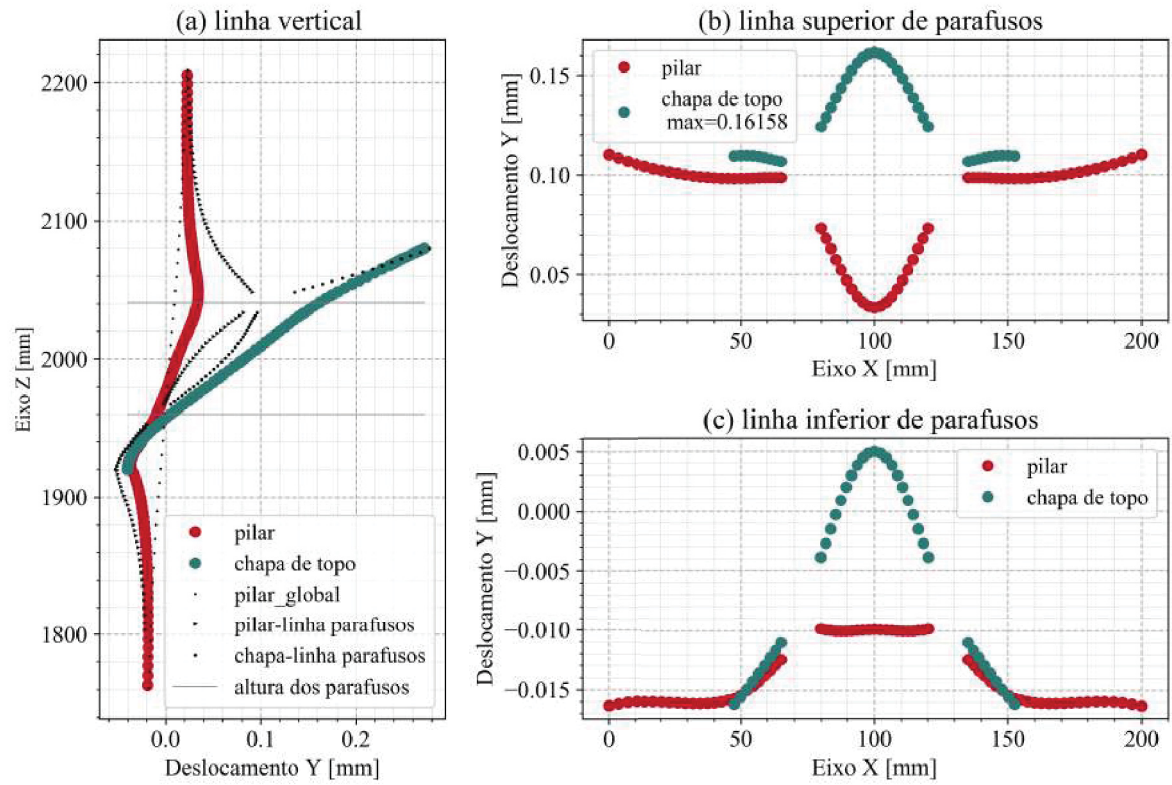


FIGURA 65 – Deslocamentos apresentados na ligação CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

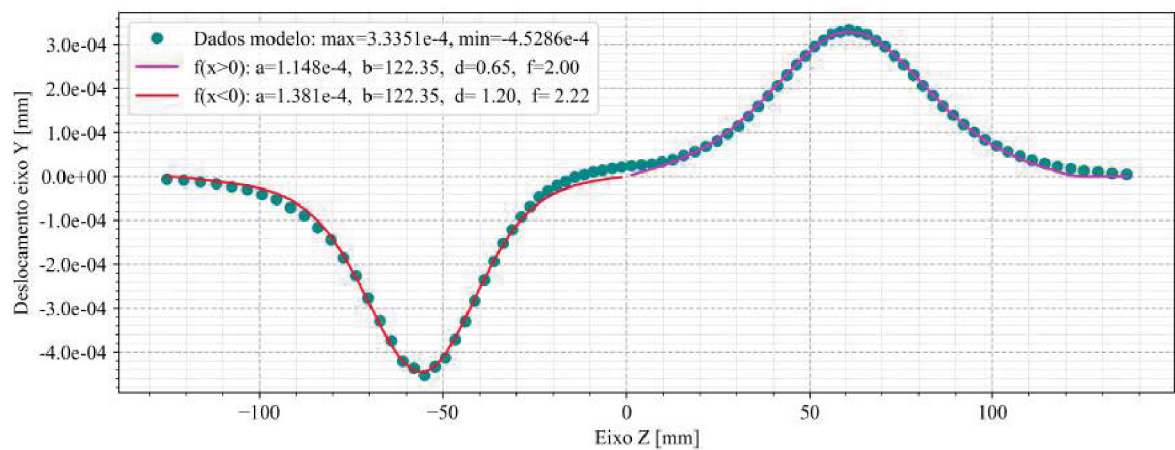


FIGURA 66 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

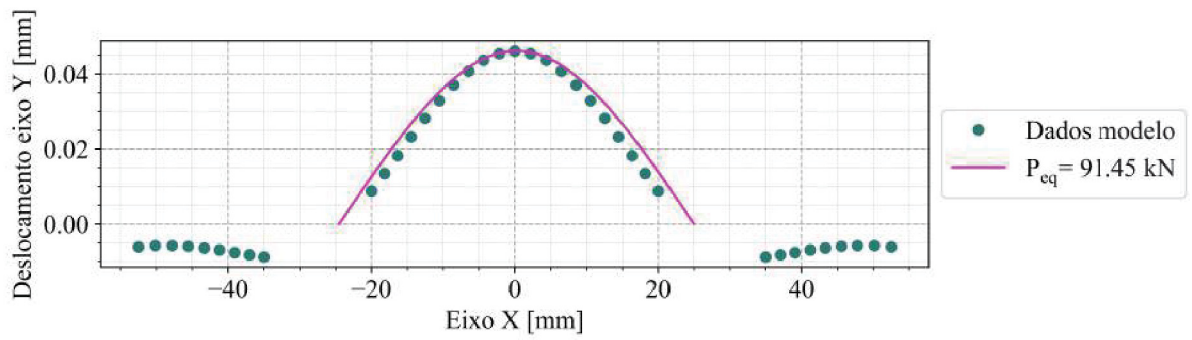


FIGURA 67 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

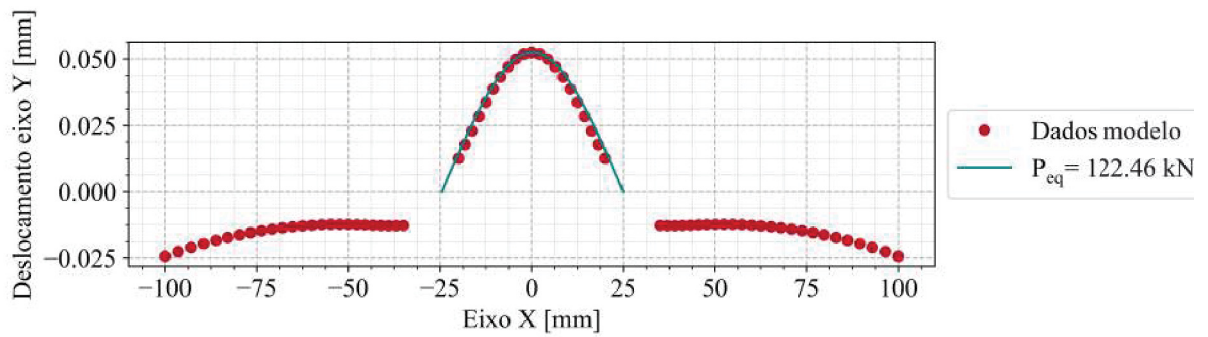


FIGURA 68 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

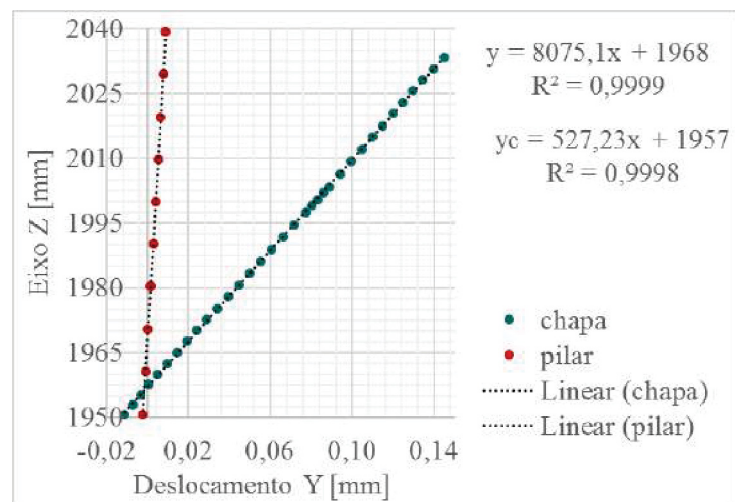


FIGURA 69 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x47_VS150x19_4 ϕ 12_ch9

CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

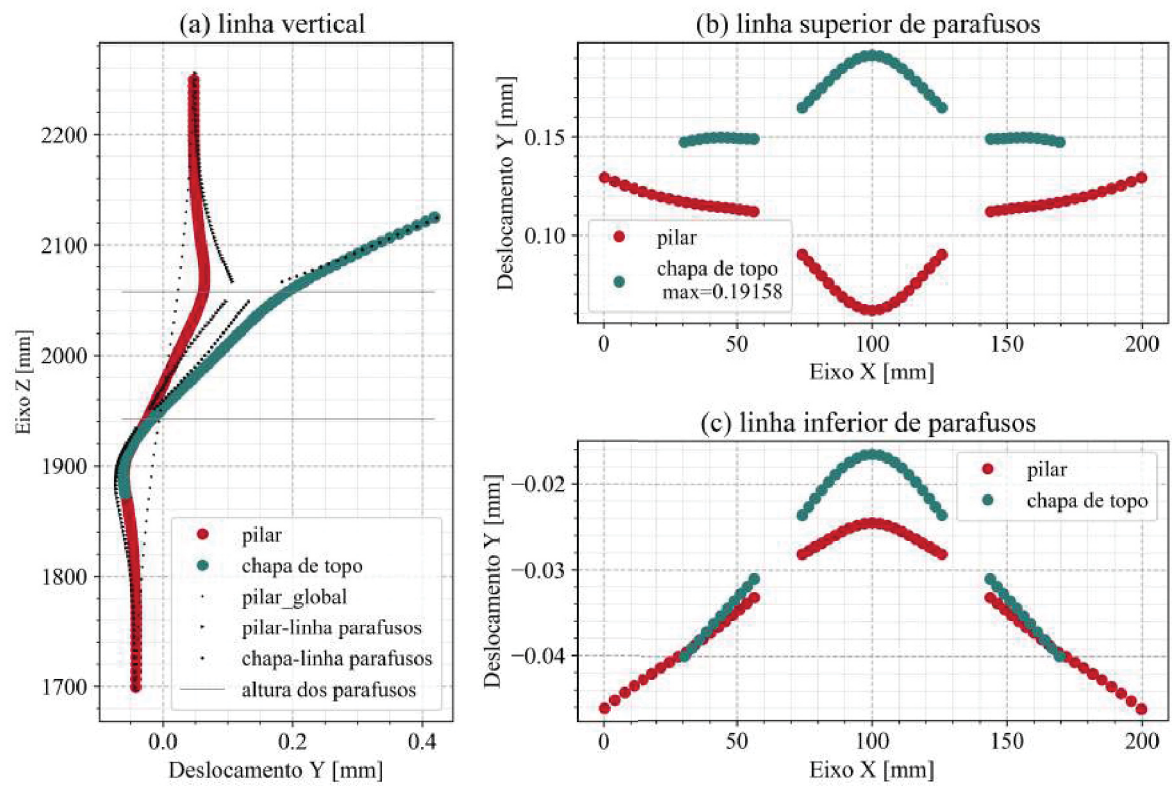


FIGURA 70 – Deslocamentos apresentados na ligação CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

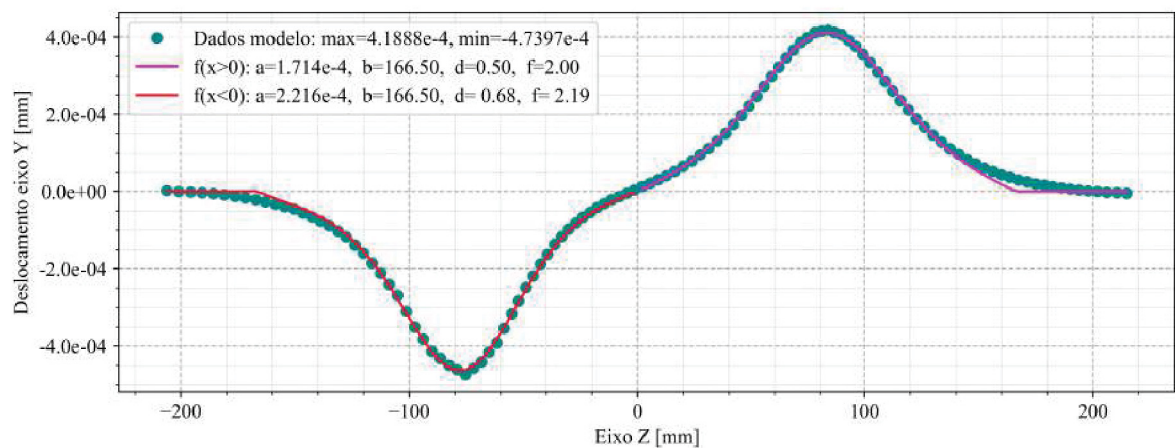


FIGURA 71 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

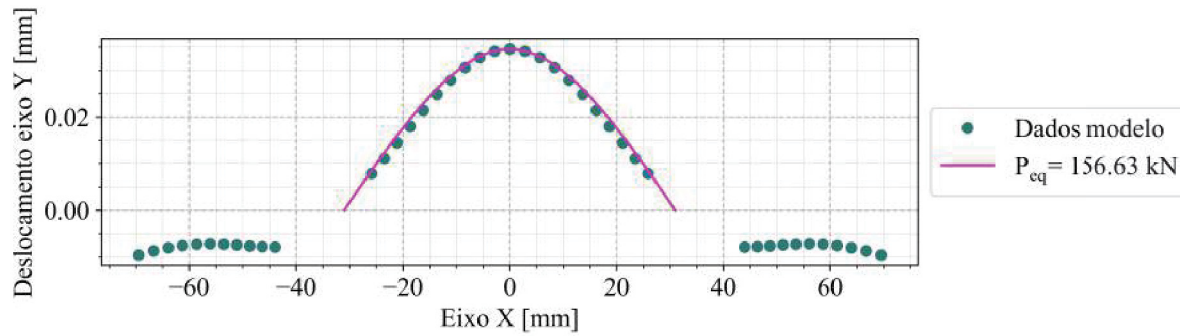


FIGURA 72 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal dos parafusos superiores, ligação CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

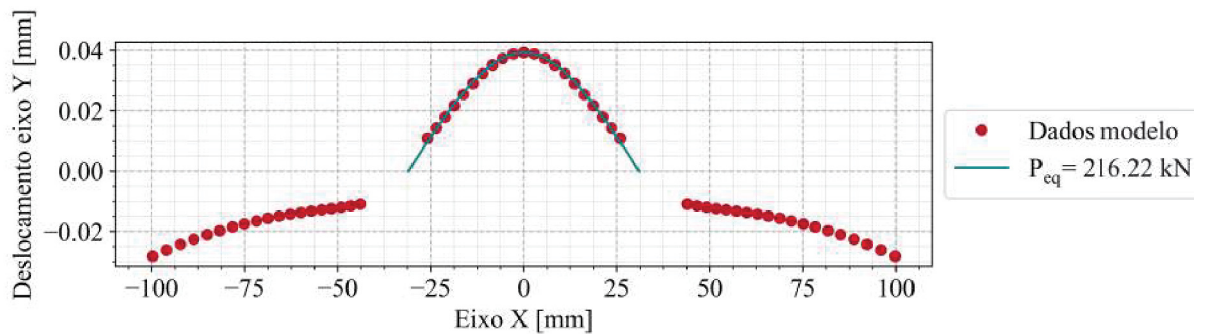


FIGURA 73 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal dos parafusos superiores, ligação CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

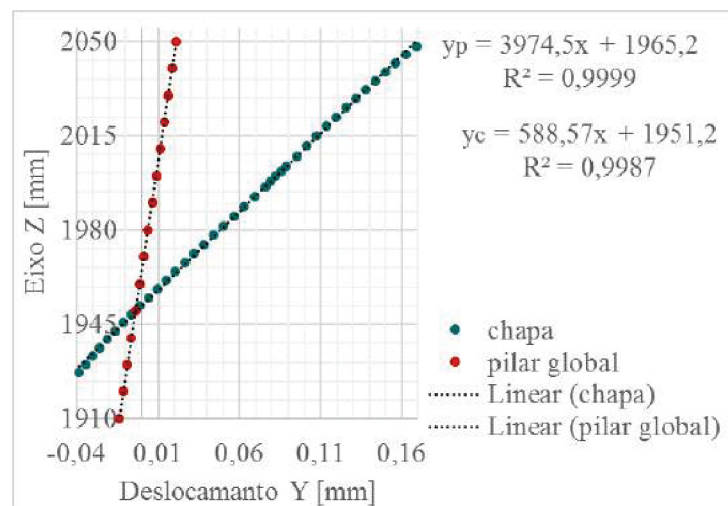


FIGURA 74 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x67_VS200x26_4 ϕ 16_ch15

CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15

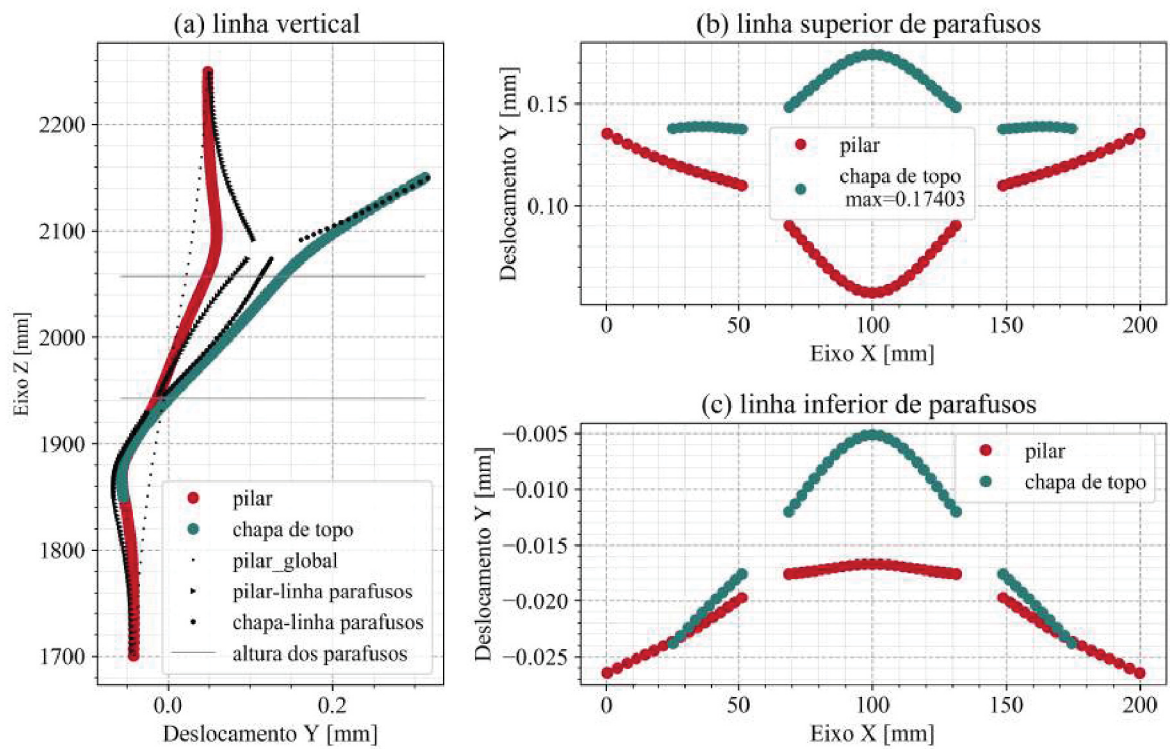


FIGURA 75 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15

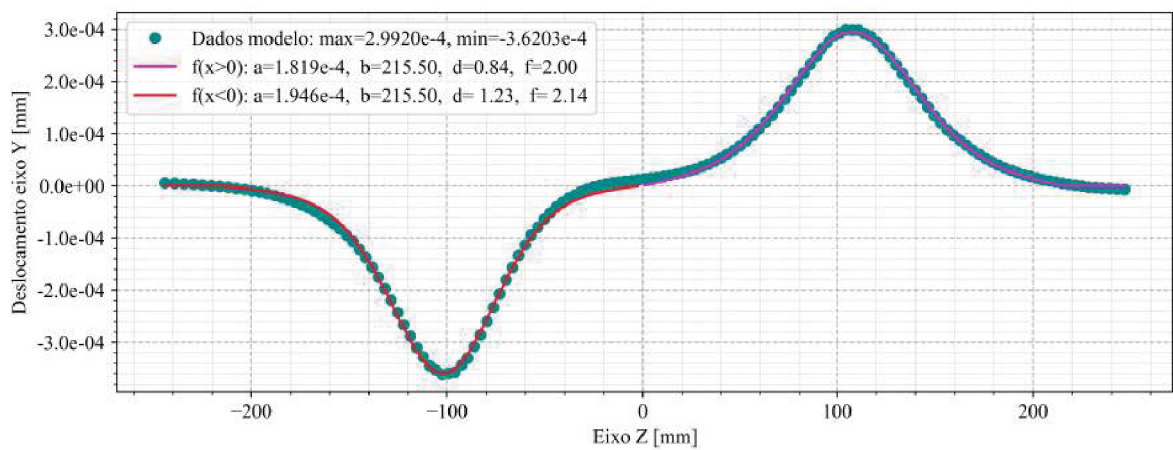


FIGURA 76 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x67_VS250x37_4φ16_ch15

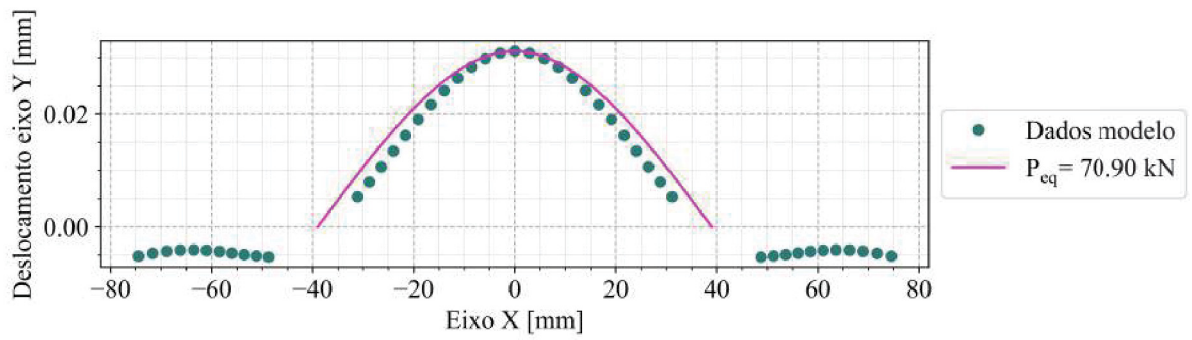


FIGURA 77 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x67_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

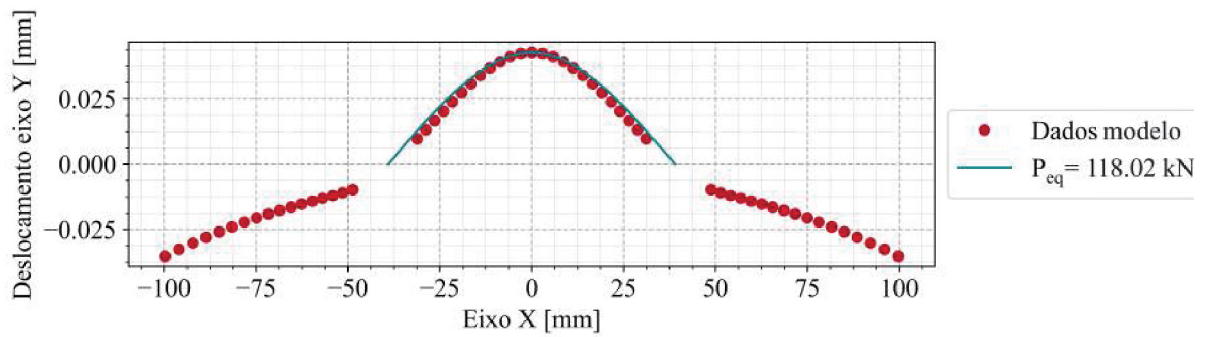


FIGURA 78 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x67_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

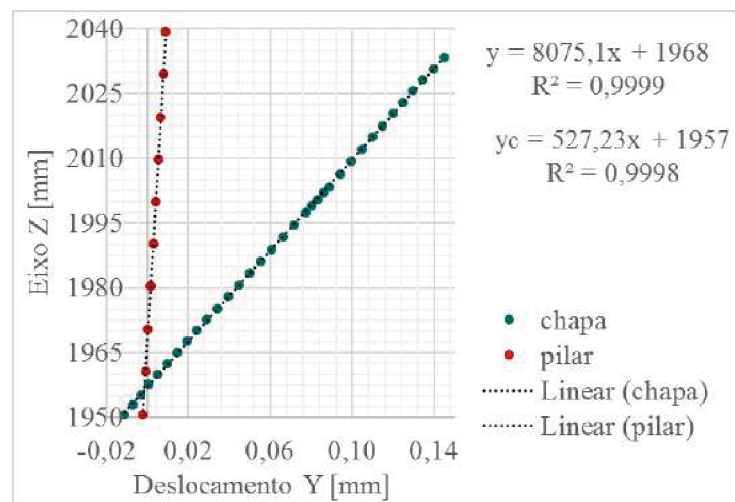


FIGURA 79 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x67_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

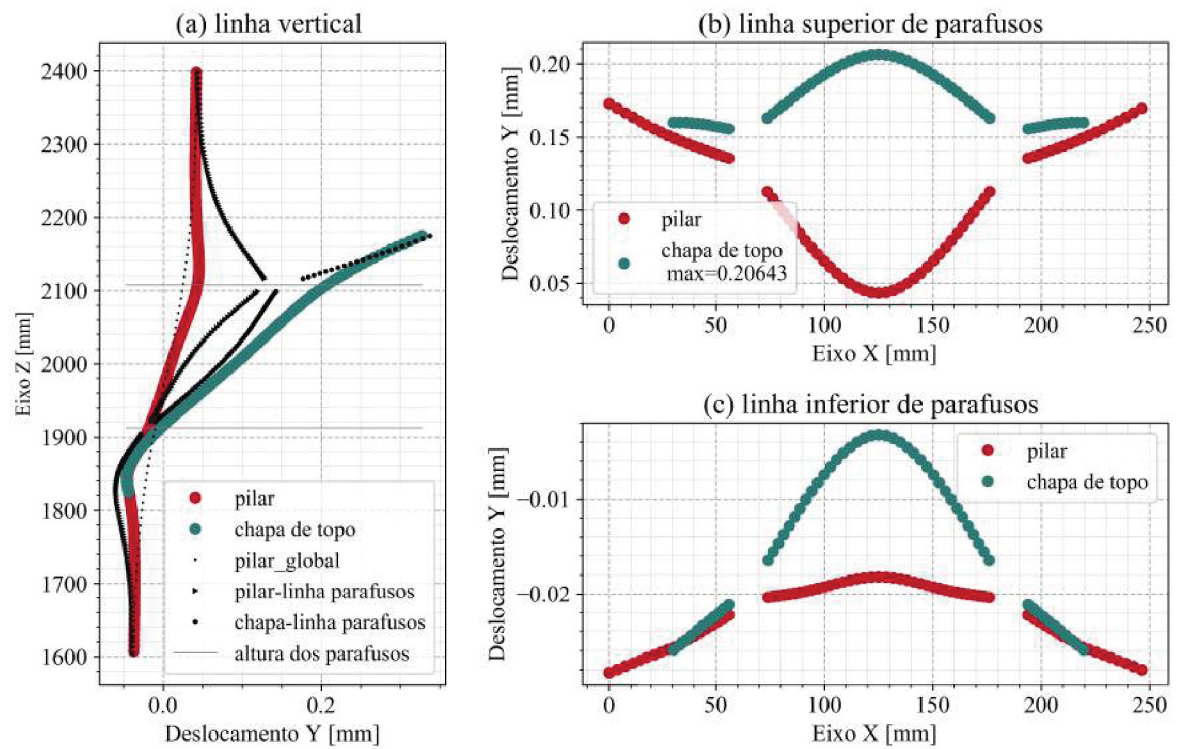


FIGURA 80 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

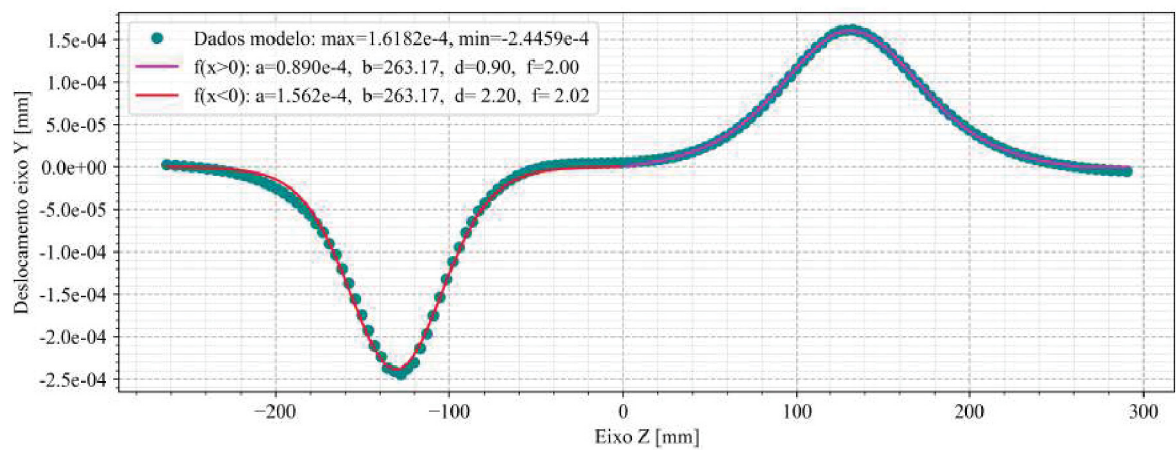


FIGURA 81 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

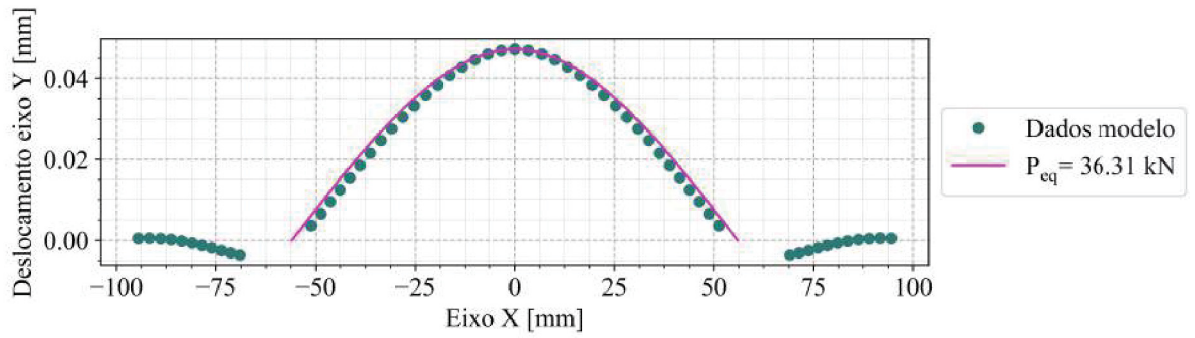


FIGURA 82 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

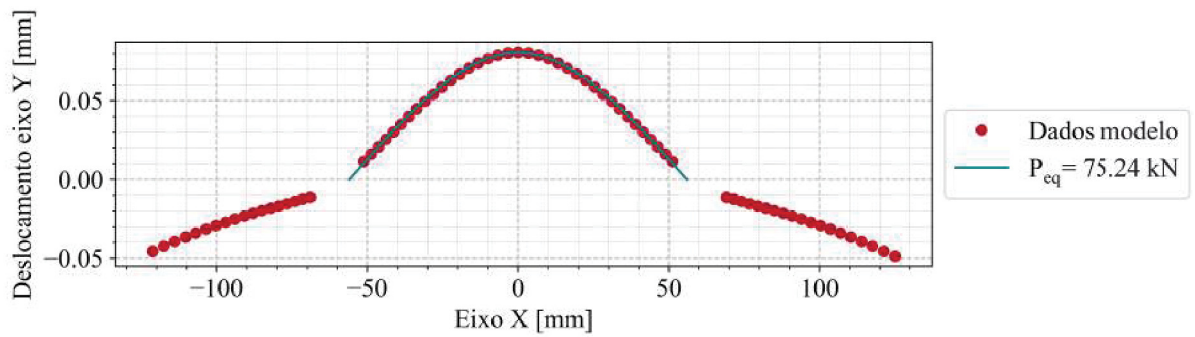


FIGURA 83 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

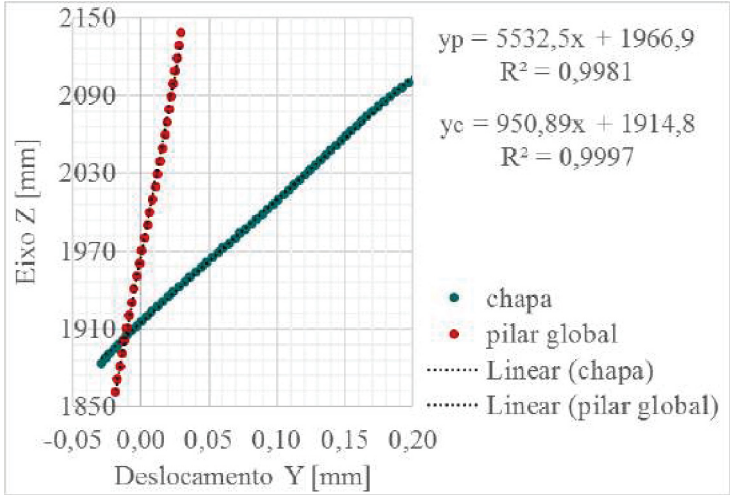


FIGURA 84 – Ângulo de rotação, ligação CVS300x83_VS300x37_4φ16_ch15

CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12

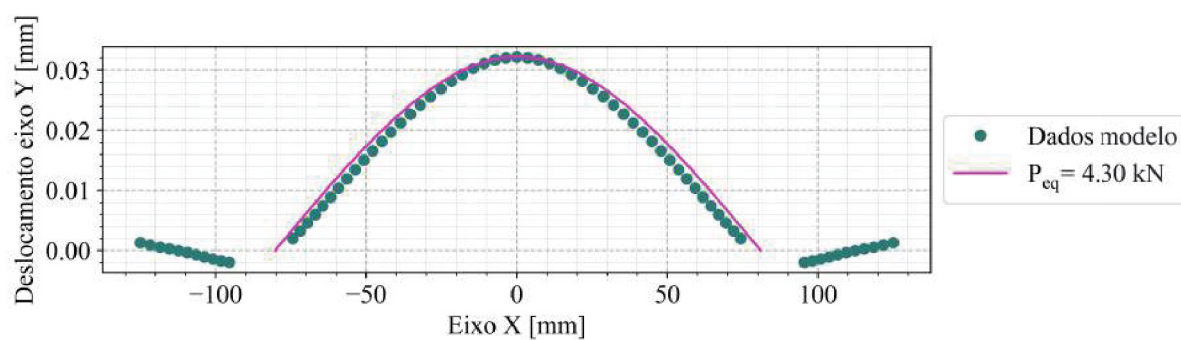


FIGURA 85 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12

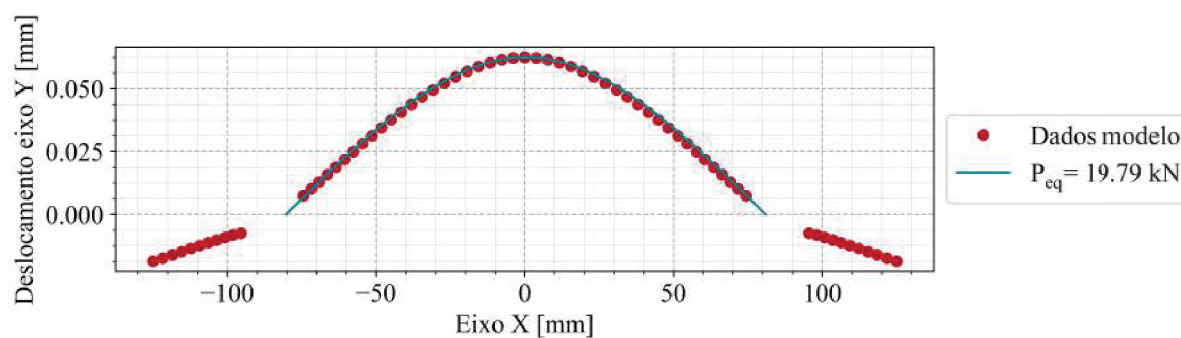


FIGURA 86 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x83_VS500X61_4φ19_ch12

CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12

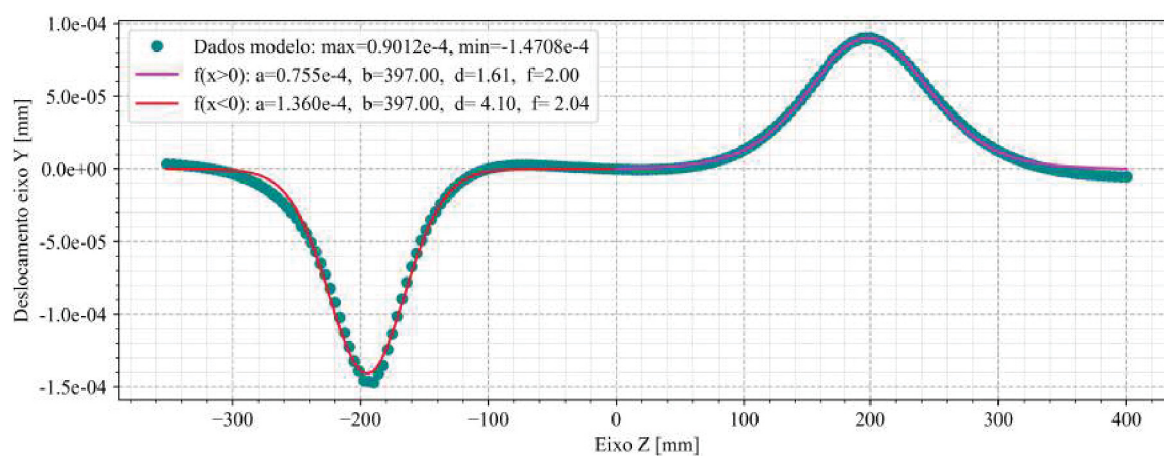


FIGURA 87 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12

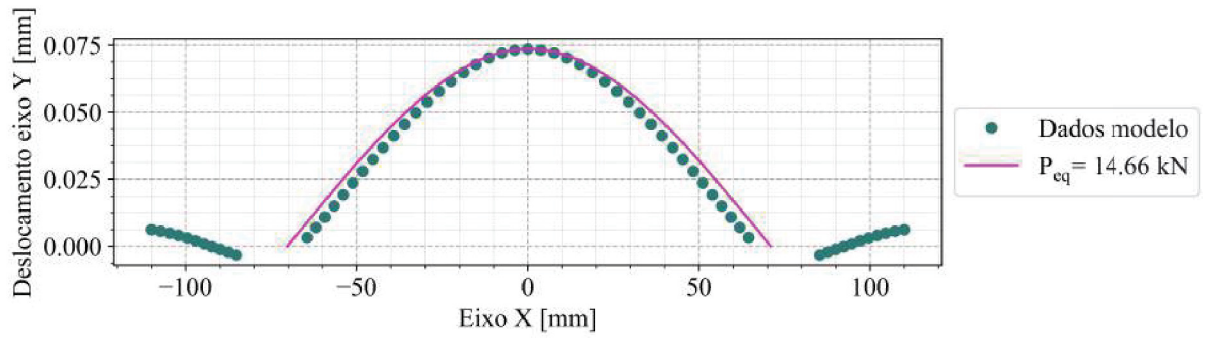


FIGURA 88 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12

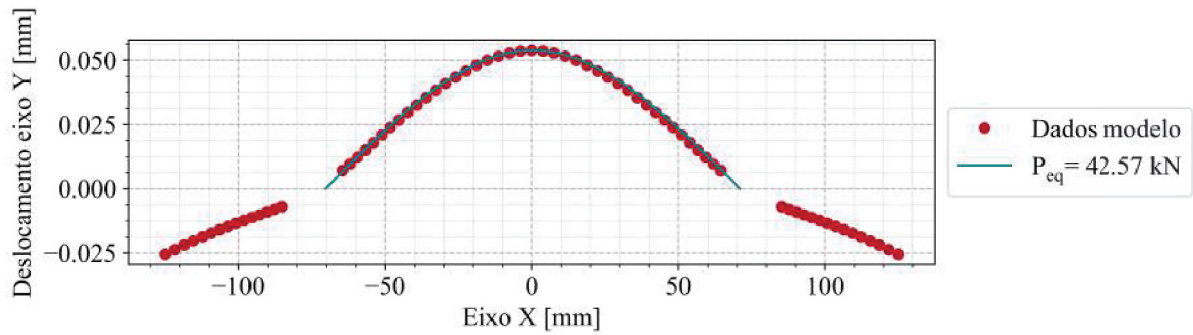


FIGURA 89 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12

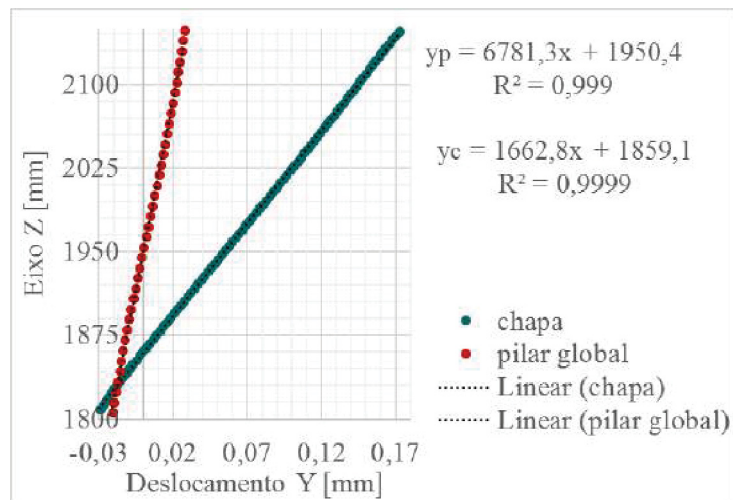


FIGURA 90 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x94_VS450X51_4φ19_ch12

CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

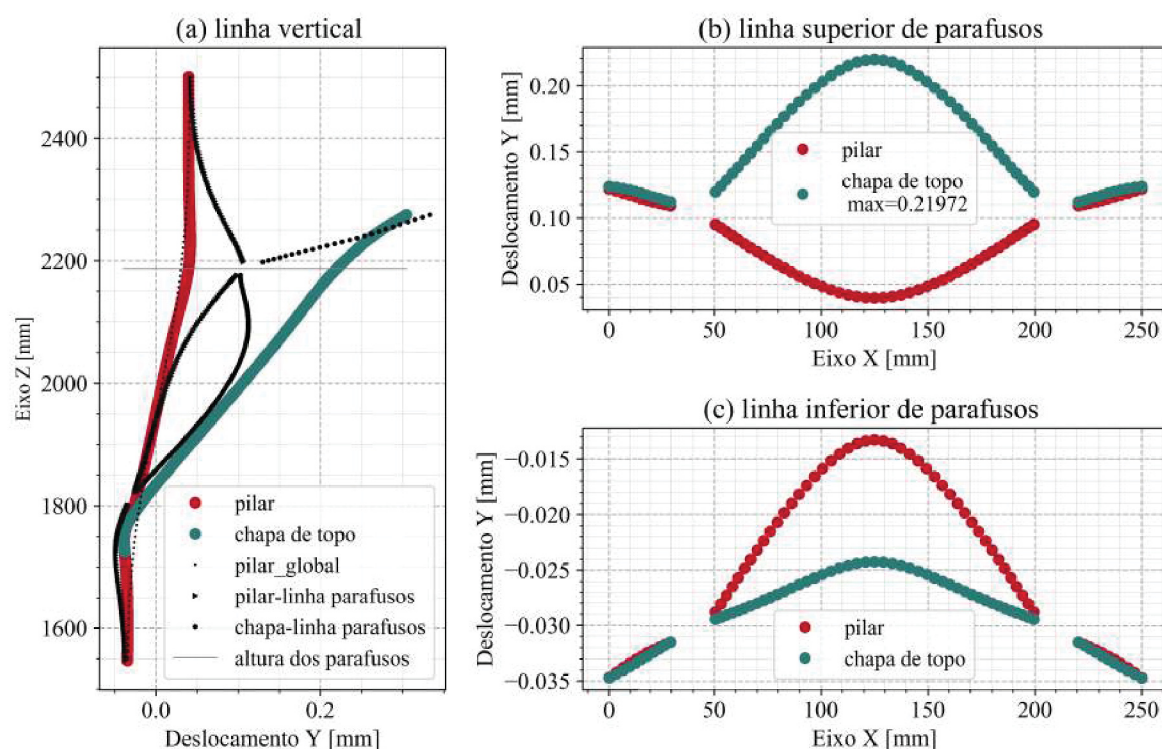


FIGURA 91 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

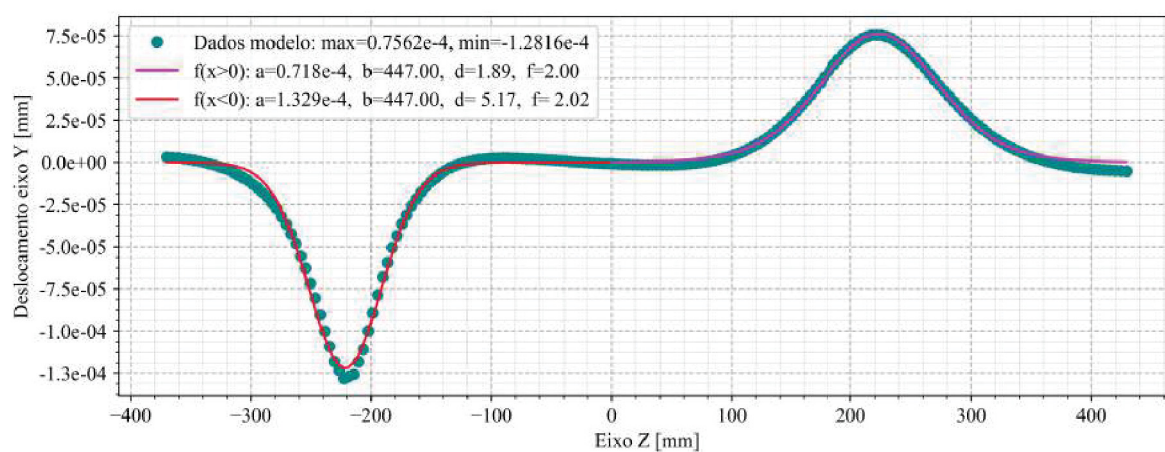


FIGURA 92 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

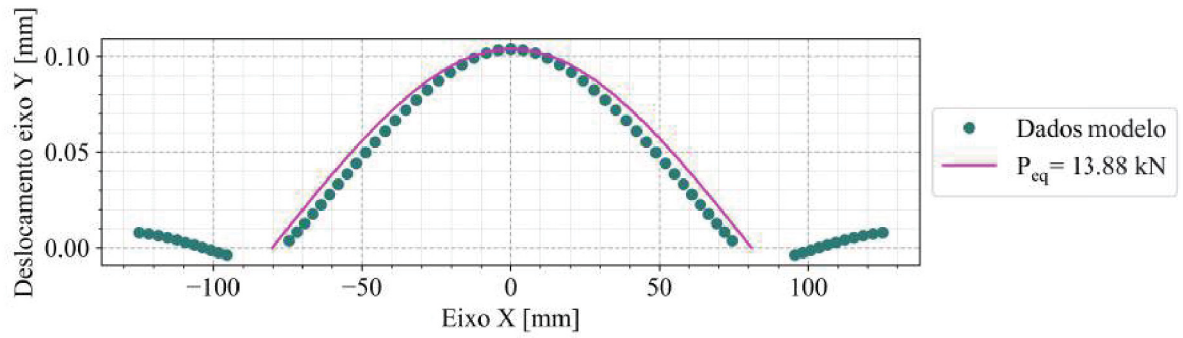


FIGURA 93 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

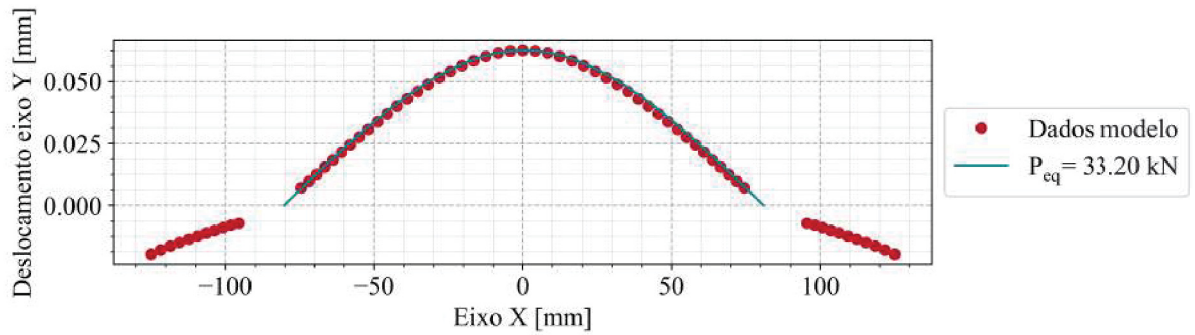


FIGURA 94 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

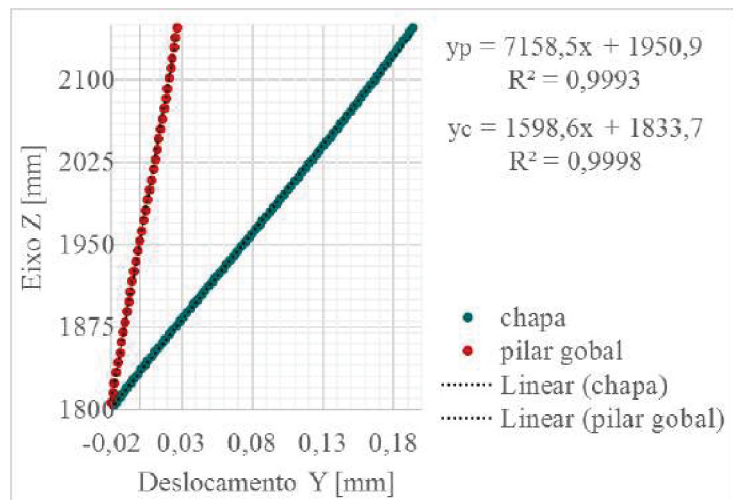


FIGURA 95 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch12

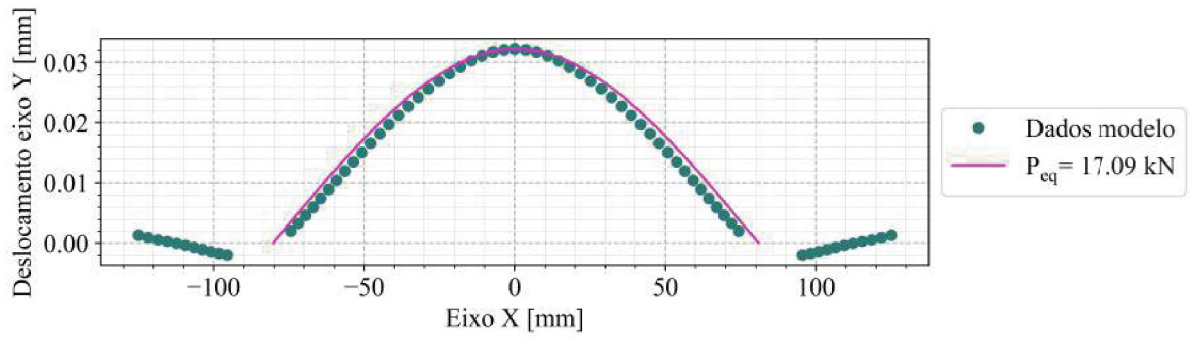


FIGURA 98 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19

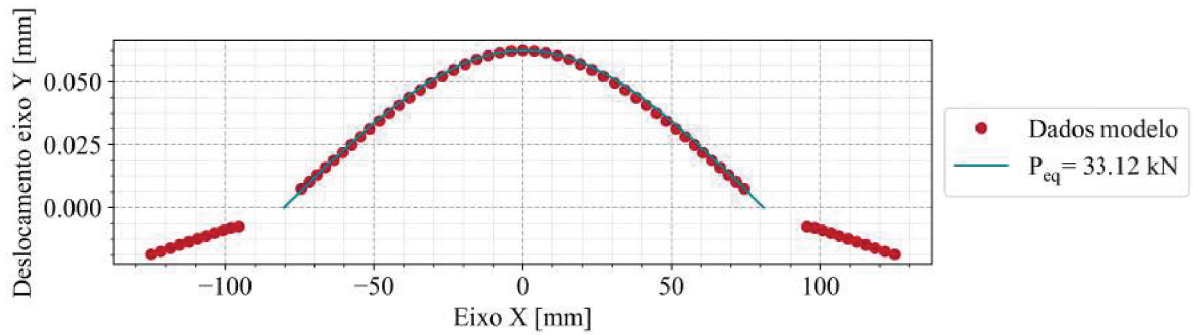


FIGURA 99 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19

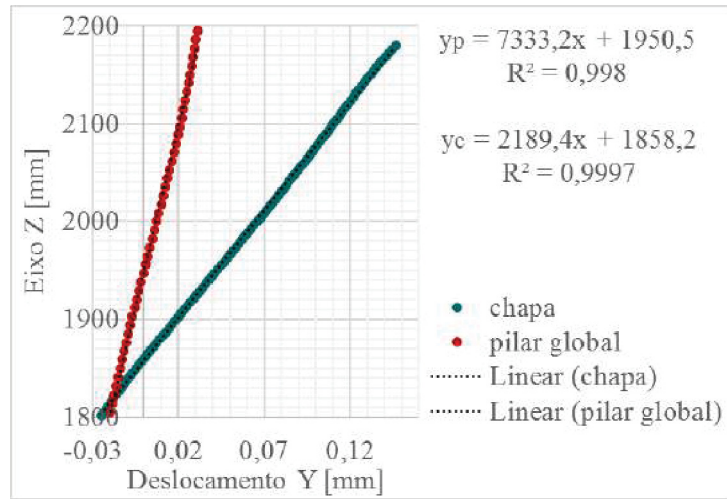


FIGURA 100 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ119_ch19

CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g

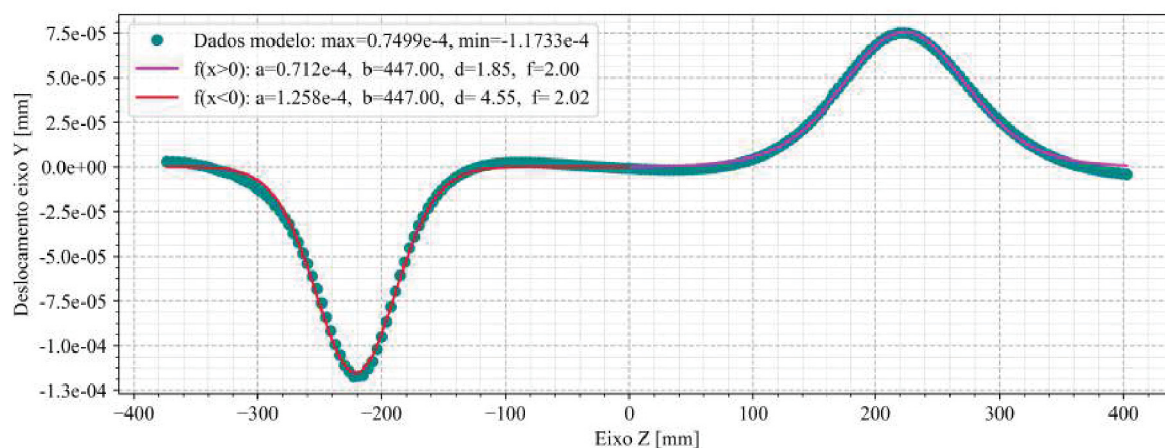


FIGURA 101 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g

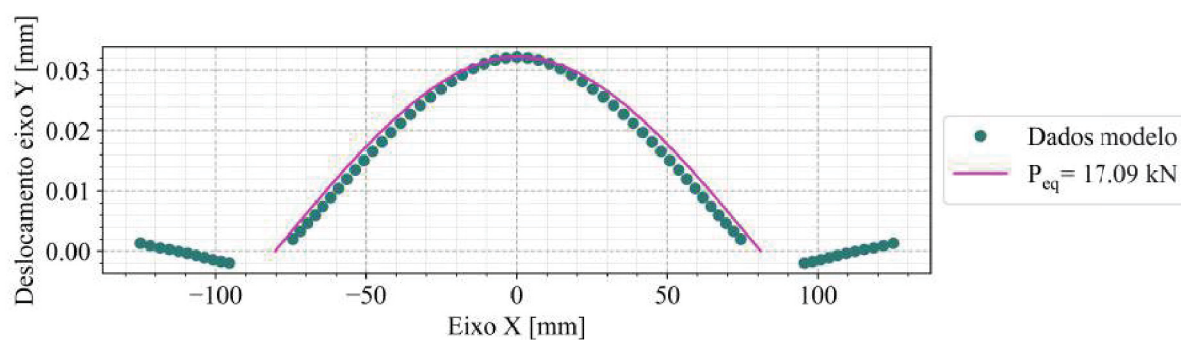


FIGURA 102 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g

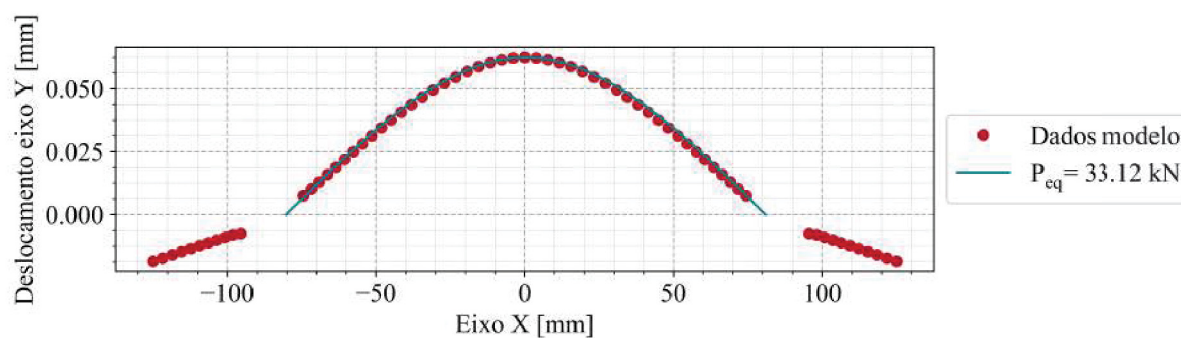


FIGURA 103 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g

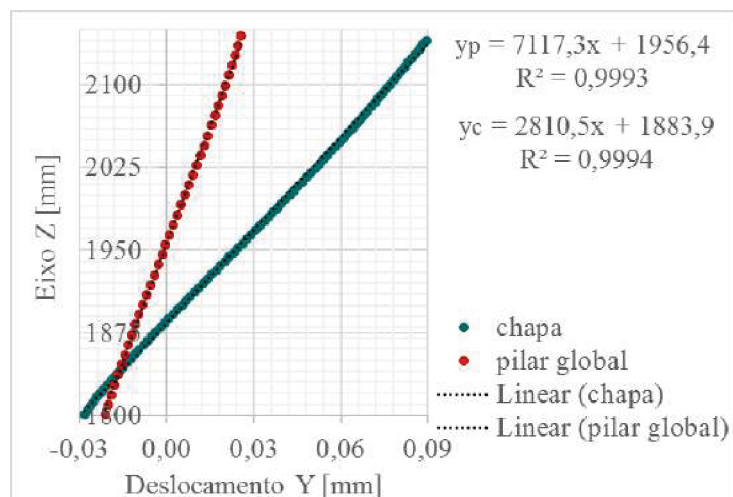


FIGURA 104 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x94_VS500X61_4φ19_ch19-g

CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19

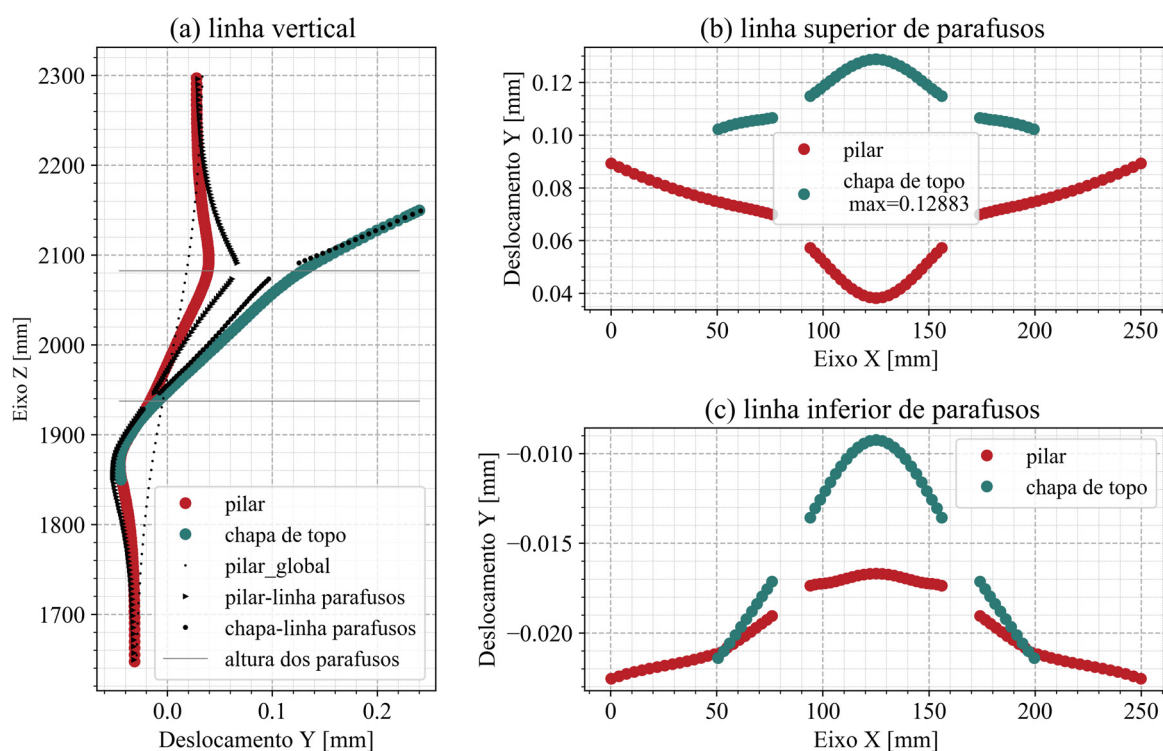


FIGURA 105 – Deslocamento total dos pontos das linhas vertical e das linhas horizontais na altura dos parafusos da ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19

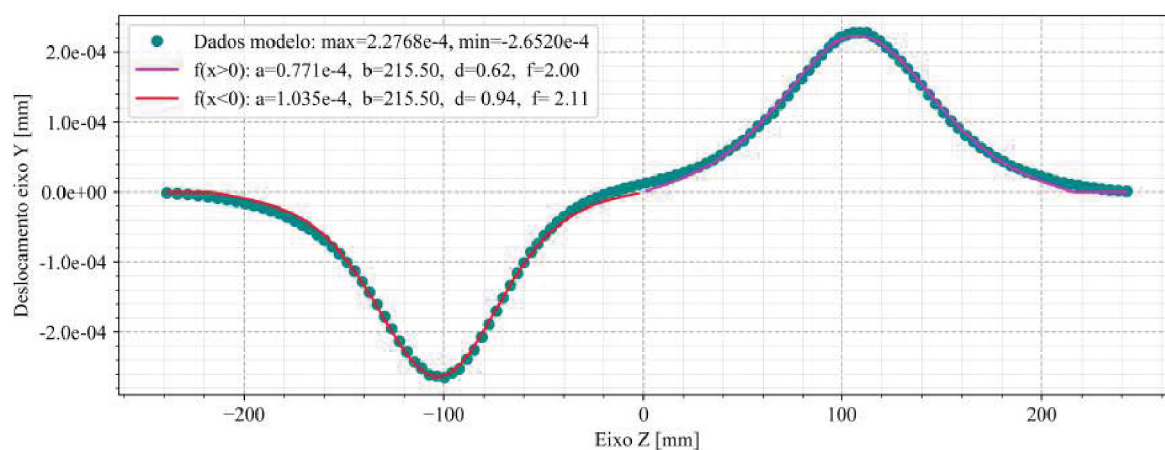


FIGURA 106 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19

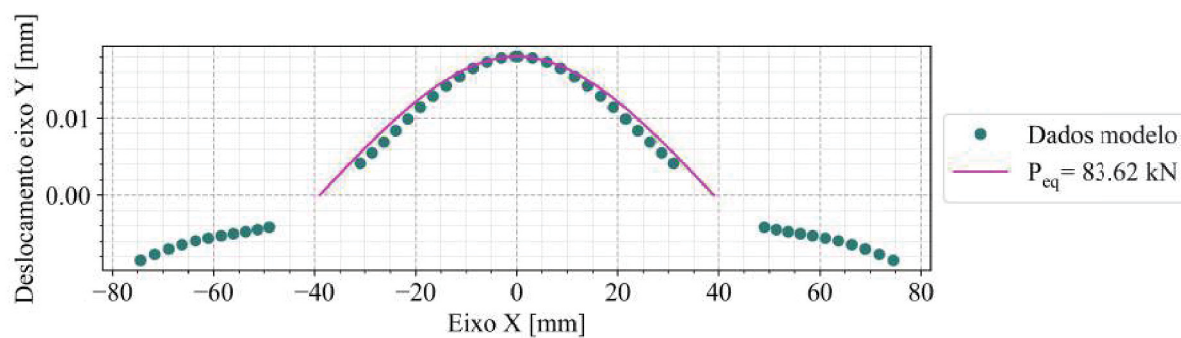


FIGURA 107 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19

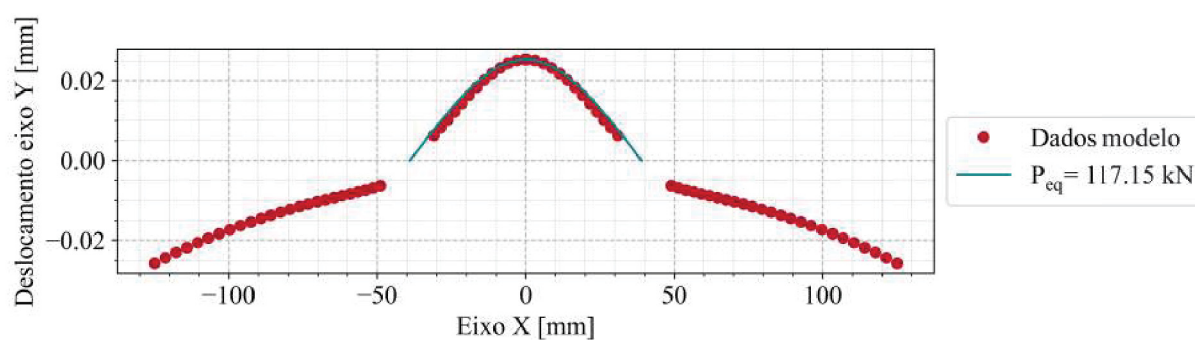


FIGURA 108 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS300x100_VS250x37_4φ16_ch19

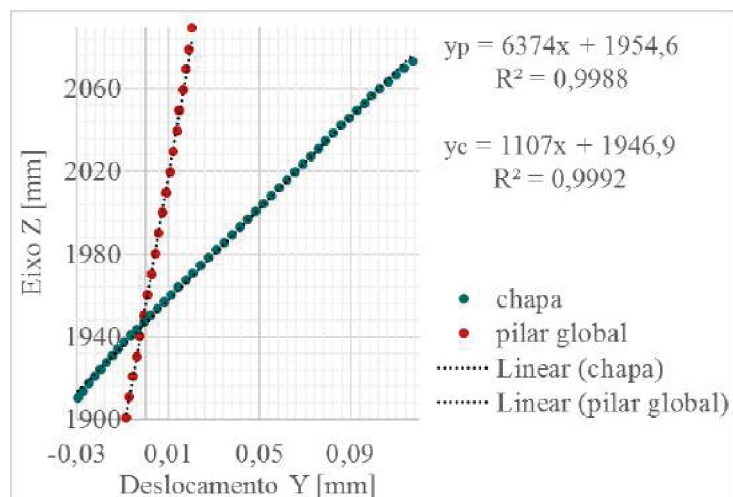


FIGURA 109 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS300x100_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

B.3 Ligações Feitas com pilares de 350 milímetros de altura

CVS350x98_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

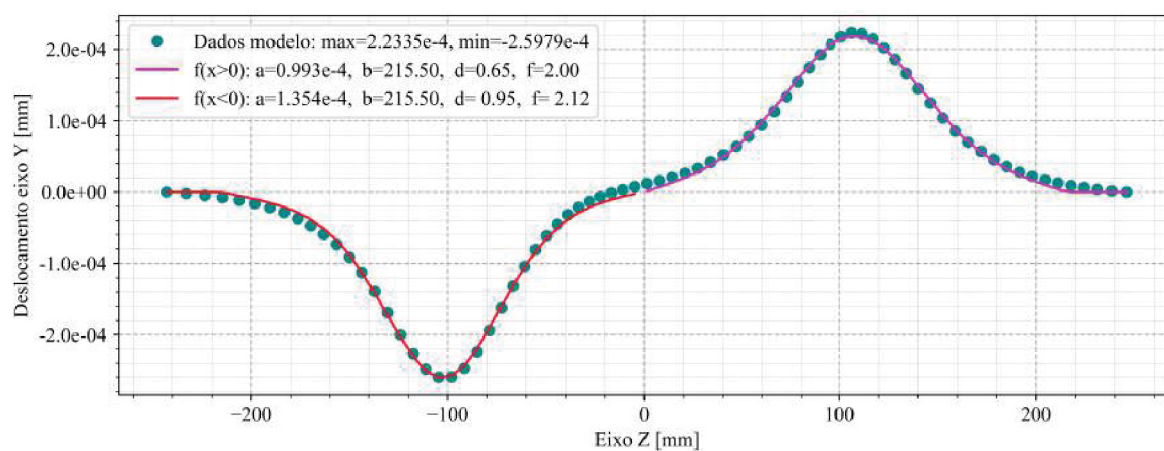


FIGURA 110 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS350x98_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

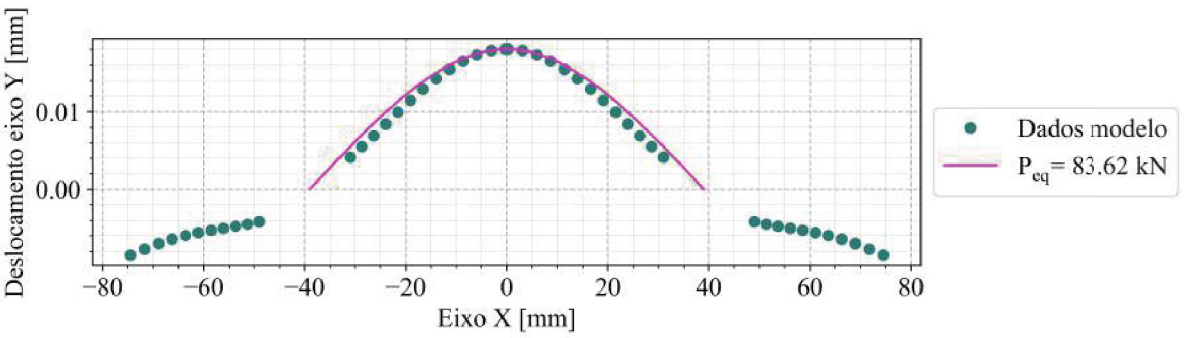


FIGURA 111 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19

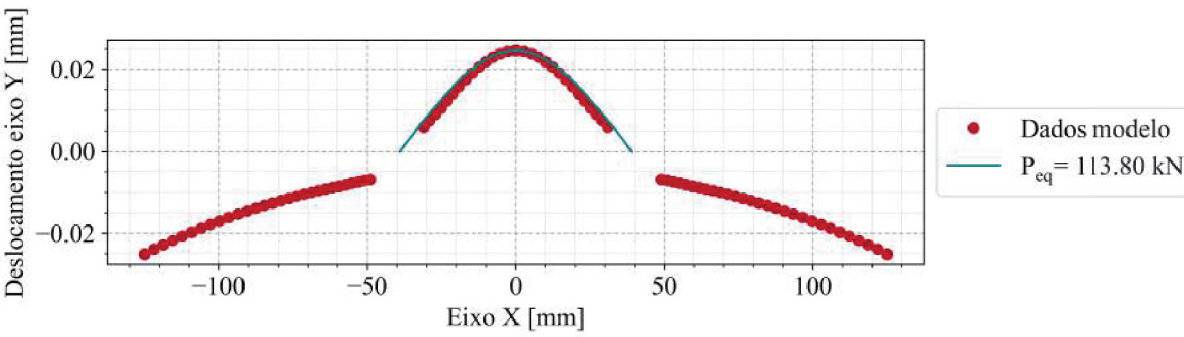


FIGURA 112 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19

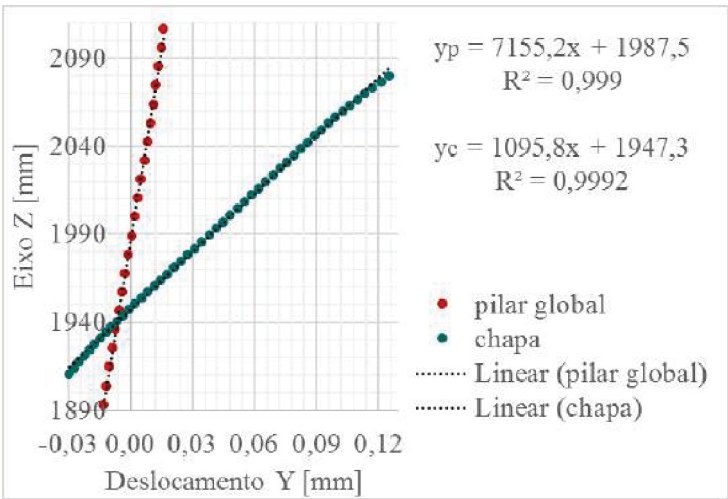
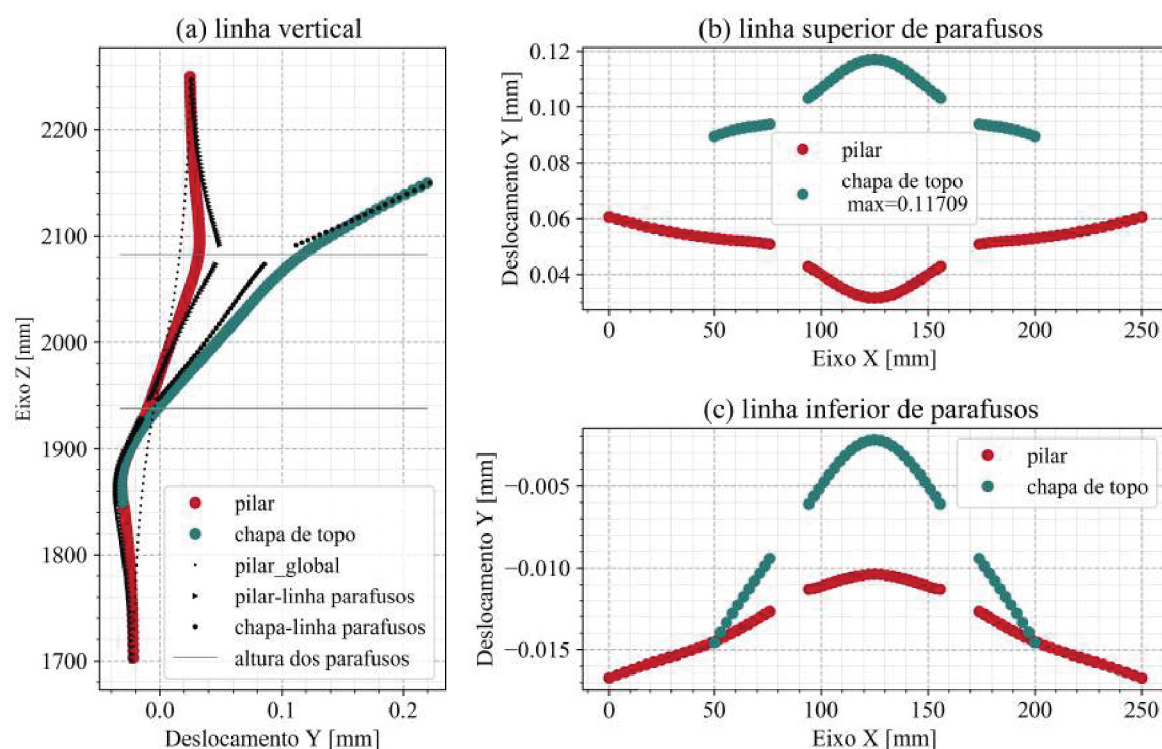
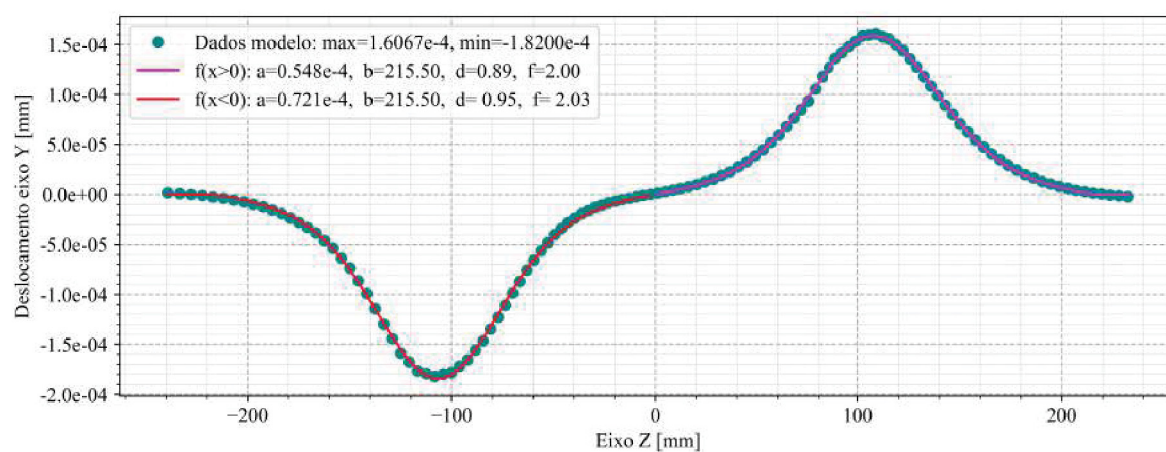


FIGURA 113 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x98_VS250x37_4φ16_ch19

CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch19FIGURA 114 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16FIGURA 115 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

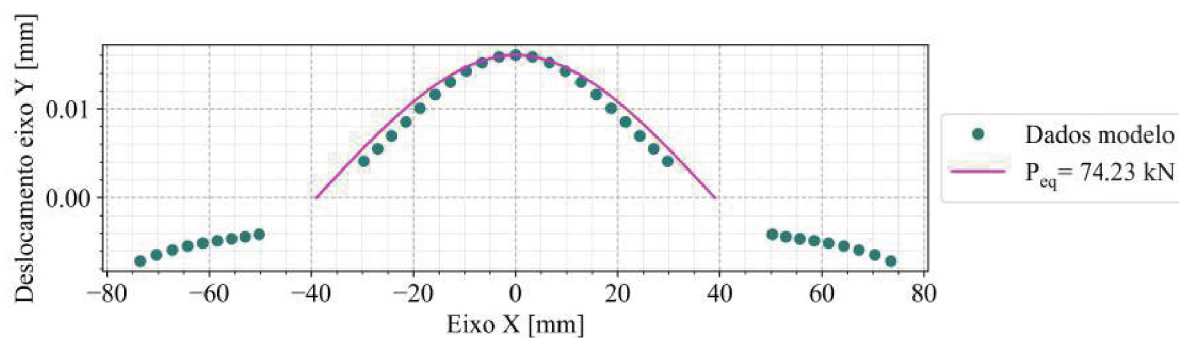


FIGURA 116 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

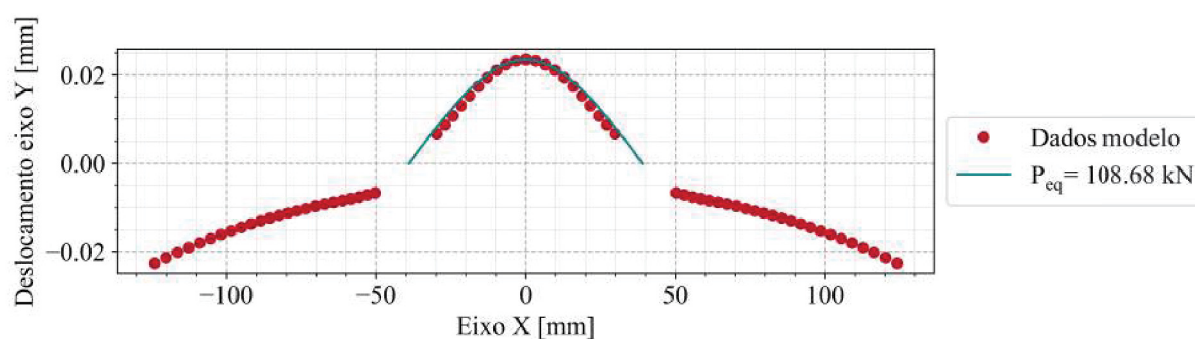


FIGURA 117 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch19

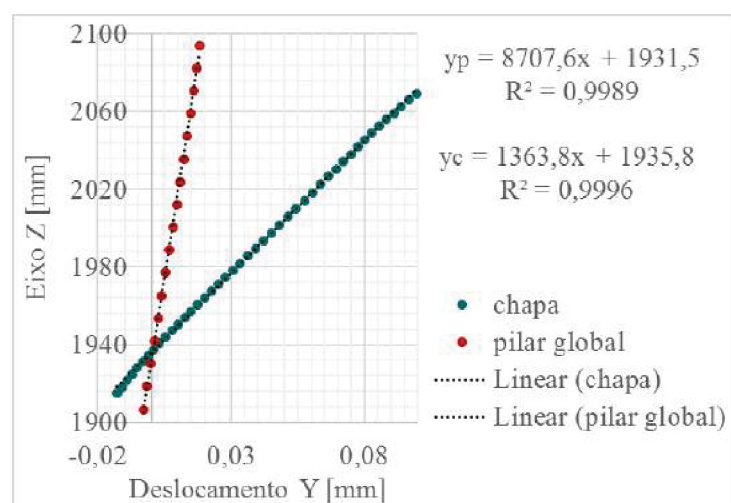
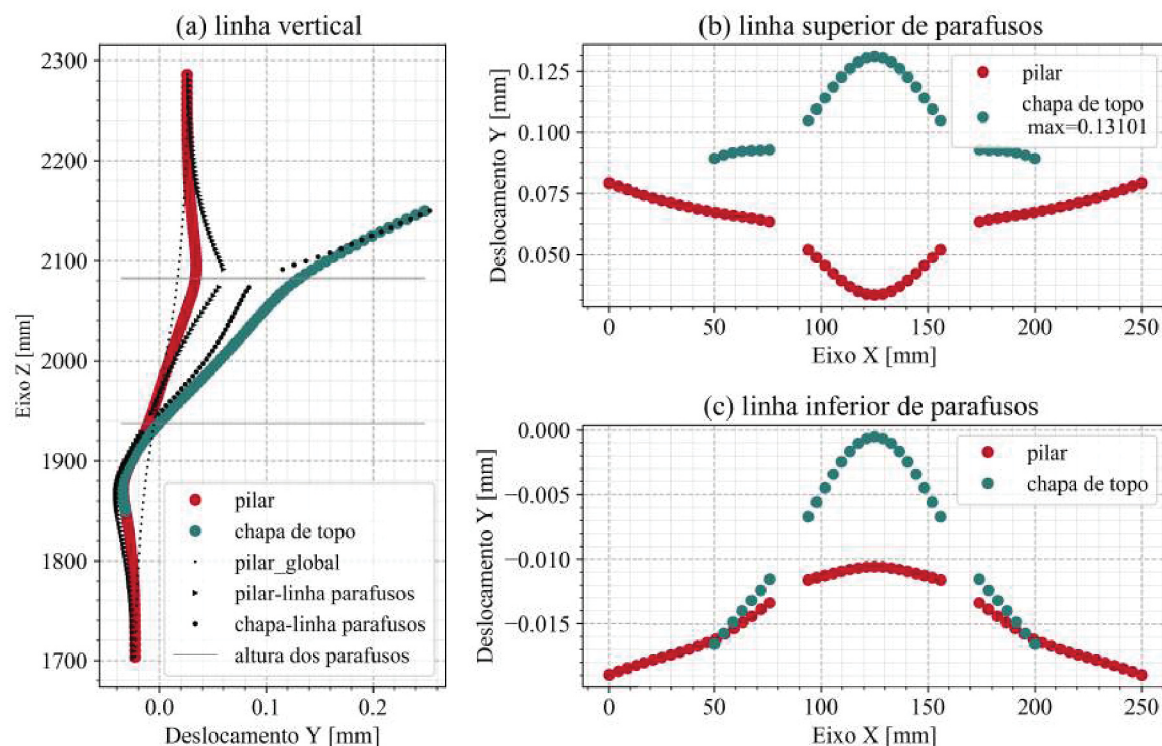
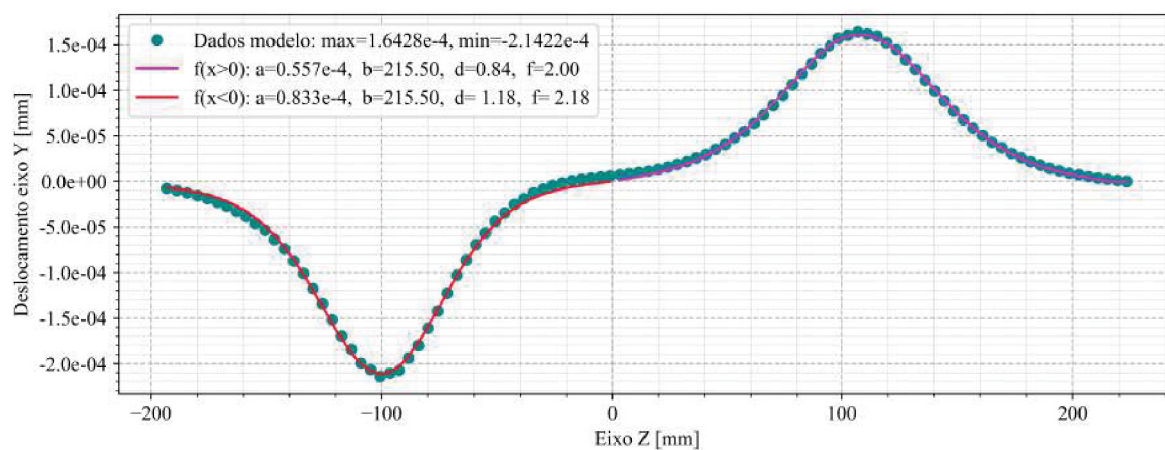


FIGURA 118 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16

CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15FIGURA 119 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15FIGURA 120 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

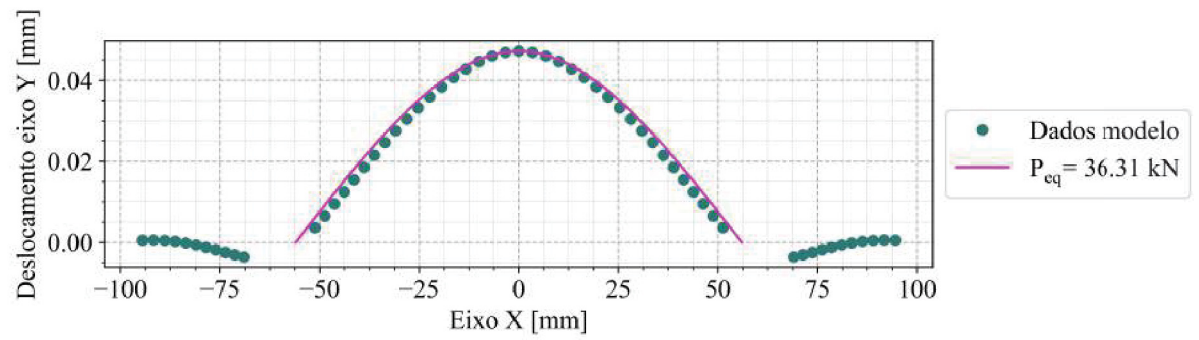


FIGURA 121 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

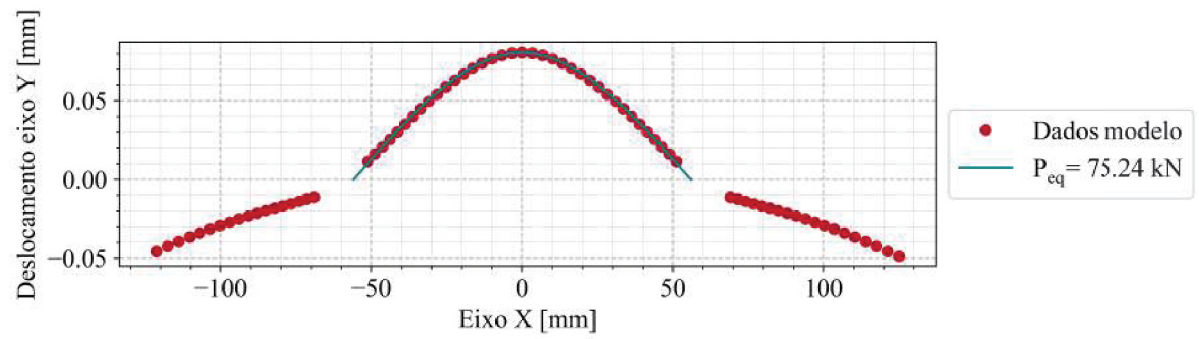


FIGURA 122 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

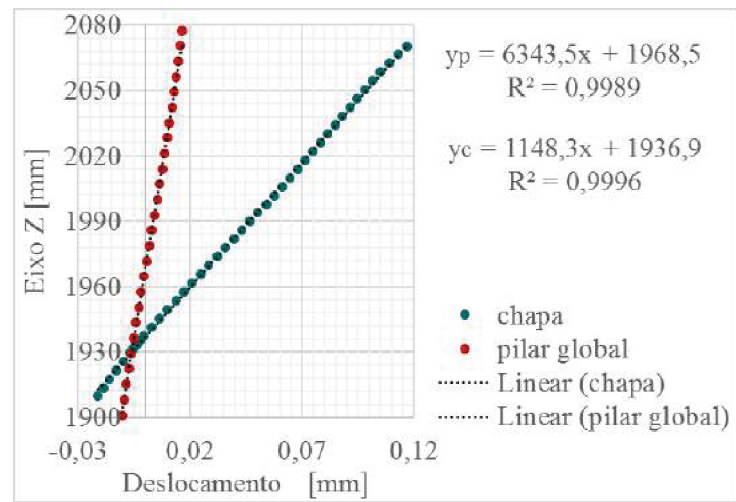


FIGURA 123 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x105_VS250x37_4 ϕ 16_ch15

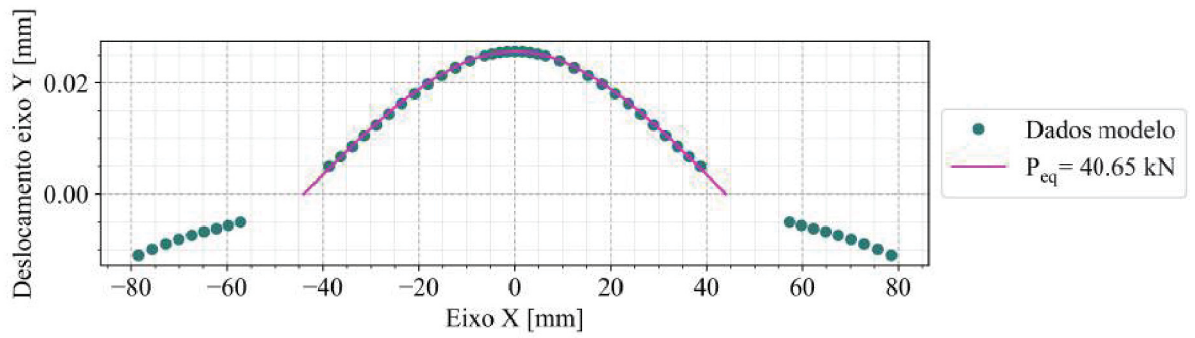


FIGURA 126 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g

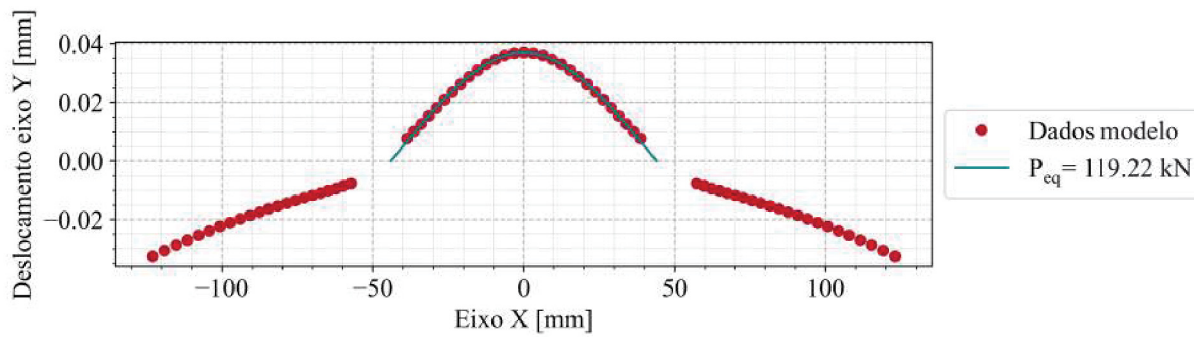


FIGURA 127 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g

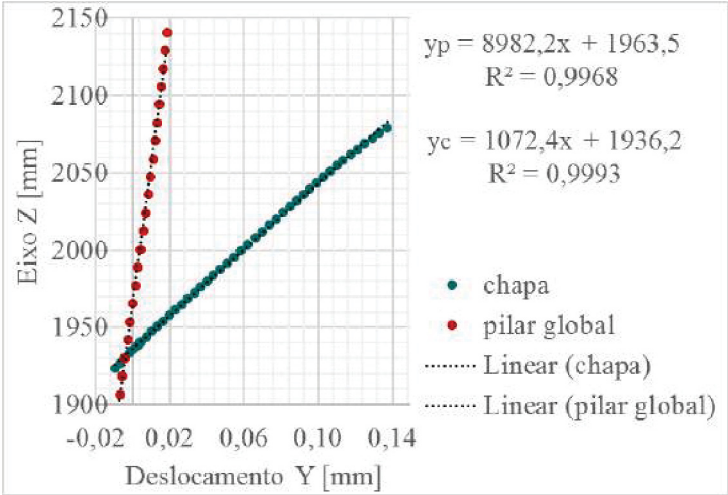


FIGURA 128 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ16_ch19+g

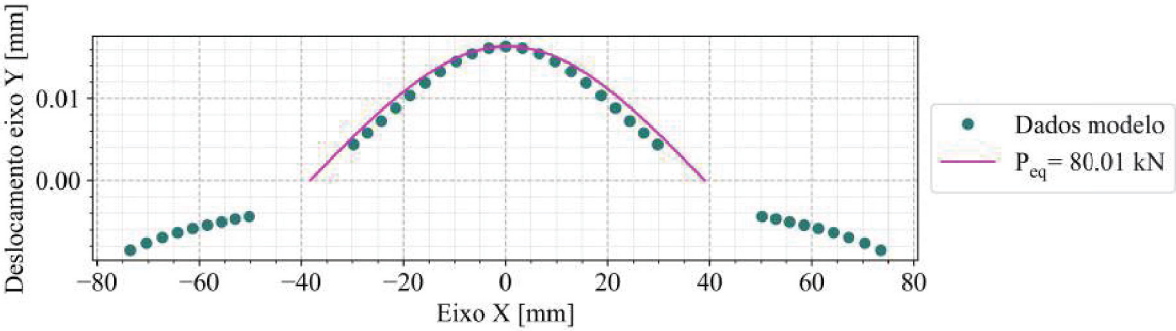


FIGURA 131 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19

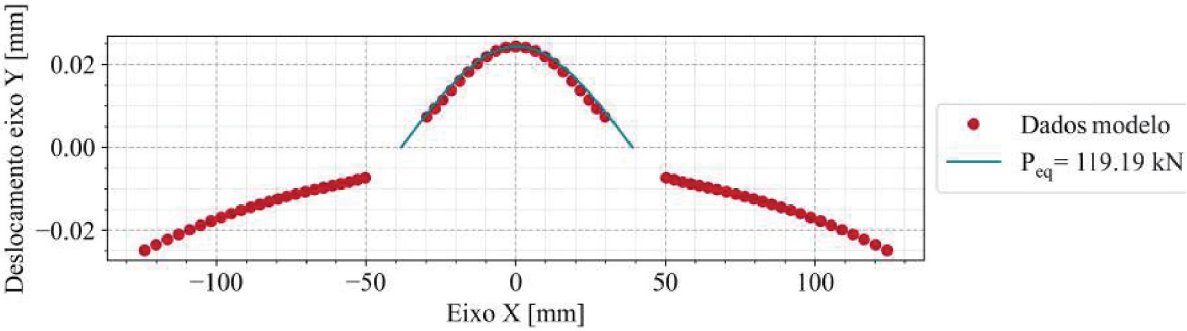


FIGURA 132 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19

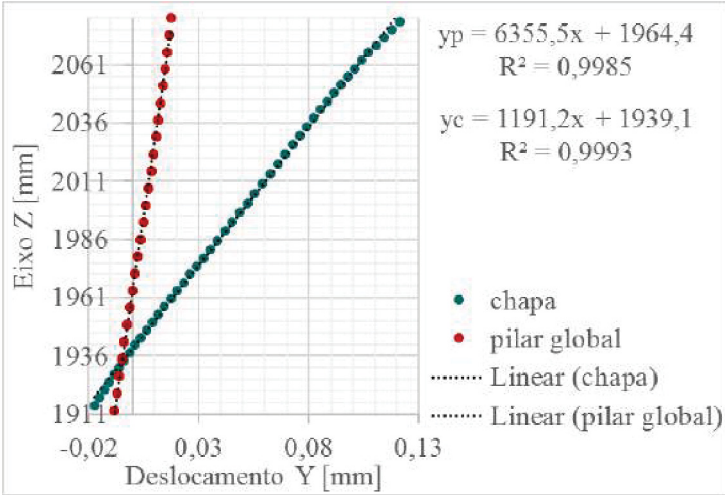
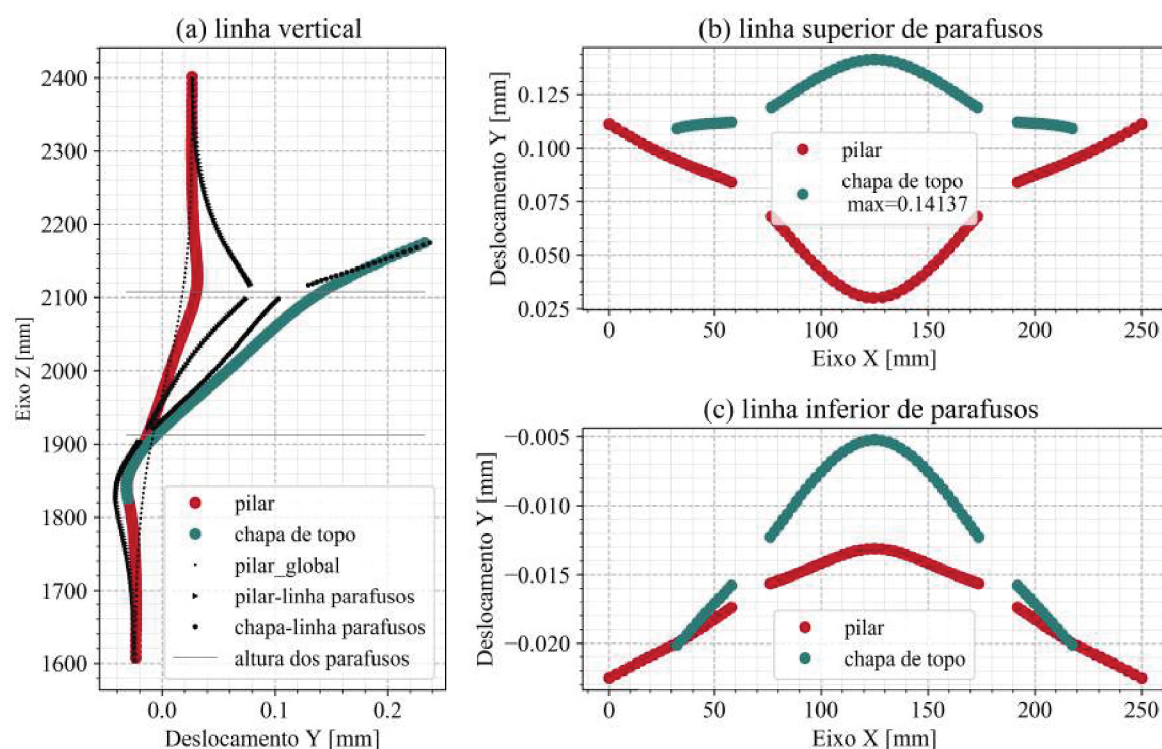
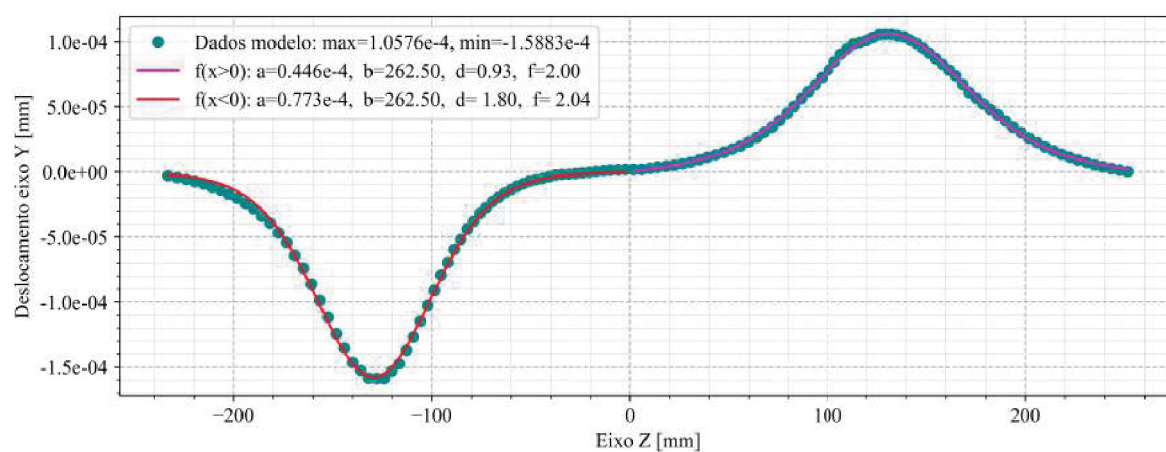


FIGURA 133 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x105_VS250x37_4φ19_ch19

CVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19FIGURA 134 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19FIGURA 135 – Deformação da alma do pilar, ligação CVSCVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19

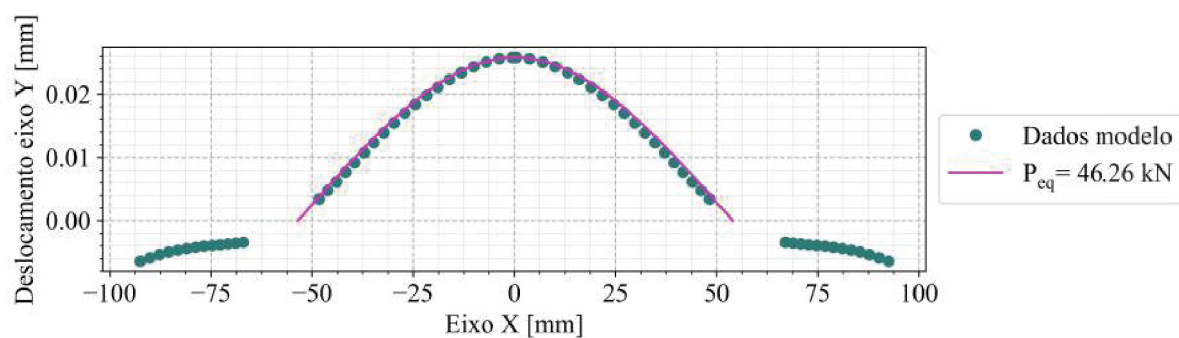


FIGURA 136 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19

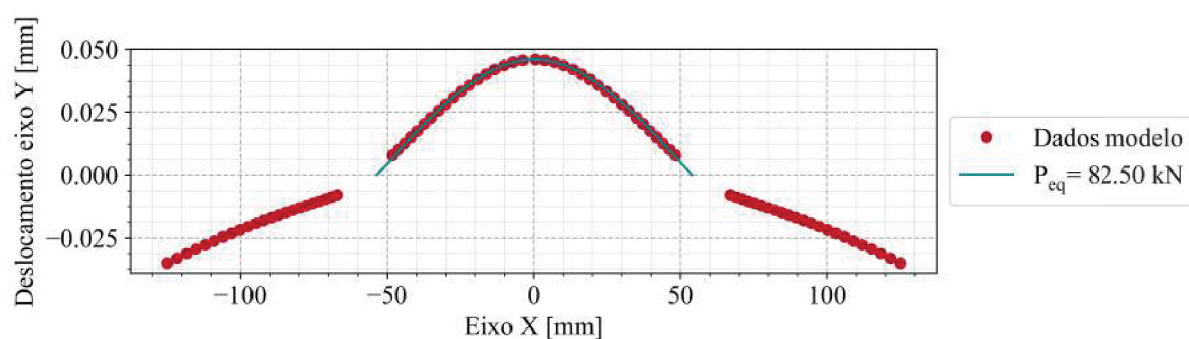


FIGURA 137 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19

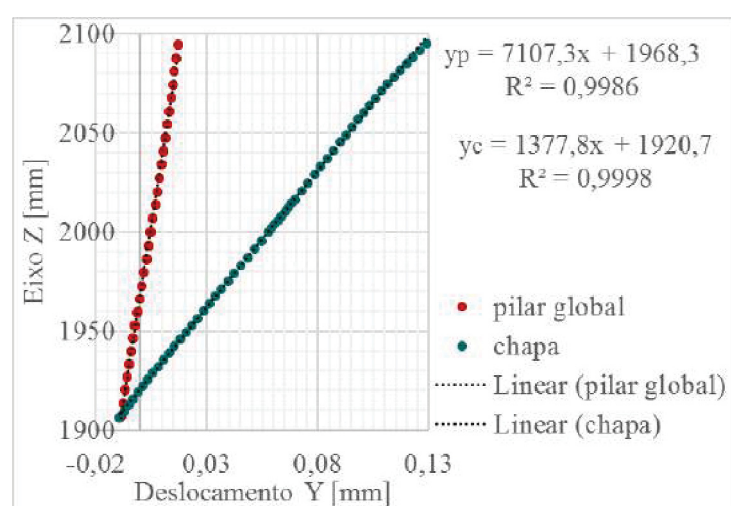


FIGURA 138 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x105_VS300x37_4 ϕ 16_ch19

CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19

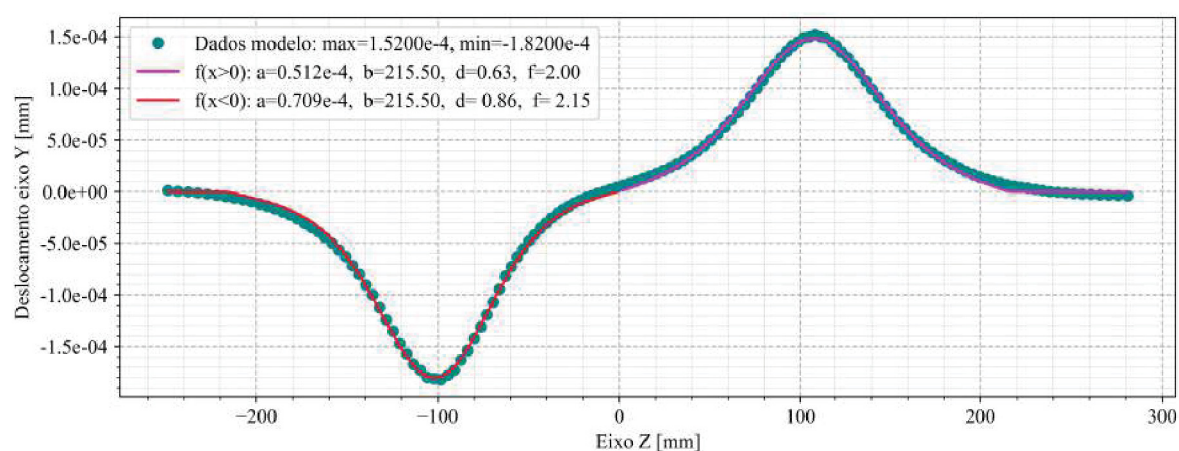


FIGURA 139 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19

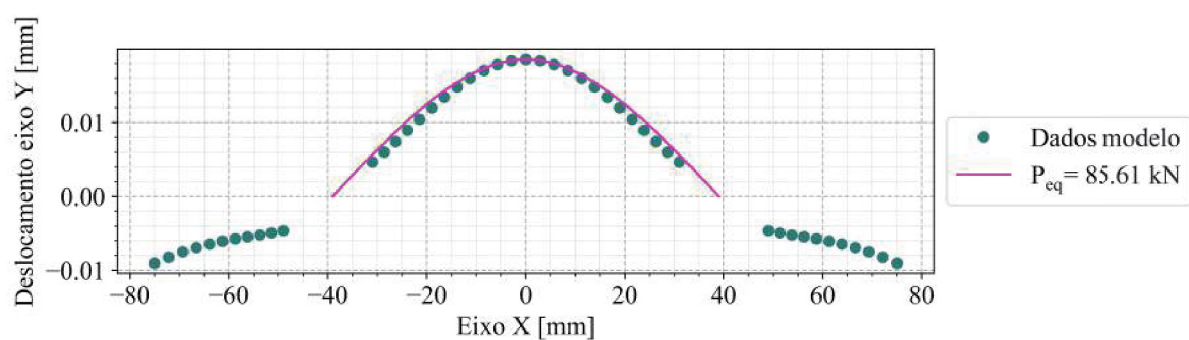


FIGURA 140 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19

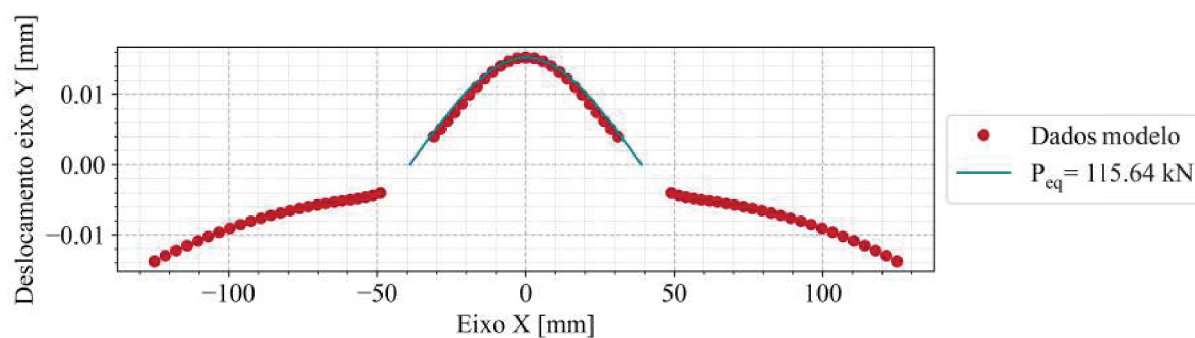


FIGURA 141 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19

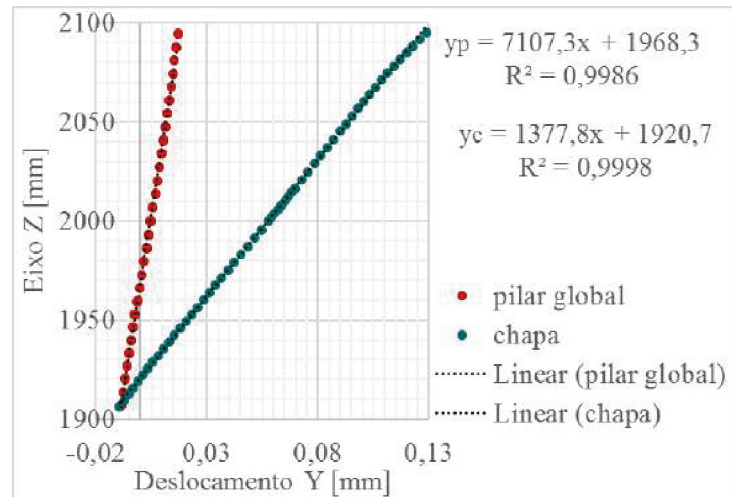


FIGURA 142 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x118_VS250x37_4φ16_ch19

CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22

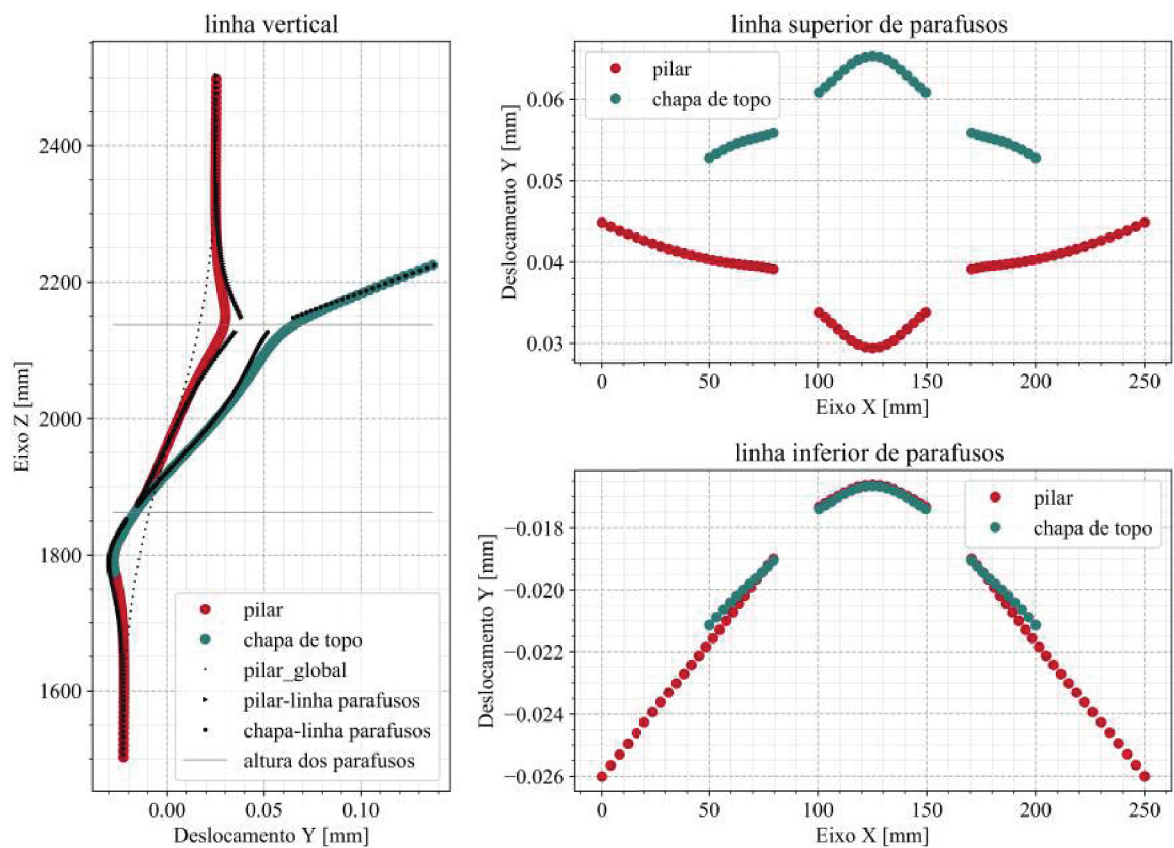


FIGURA 143 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350x118_VS400x35_4φ19_ch22

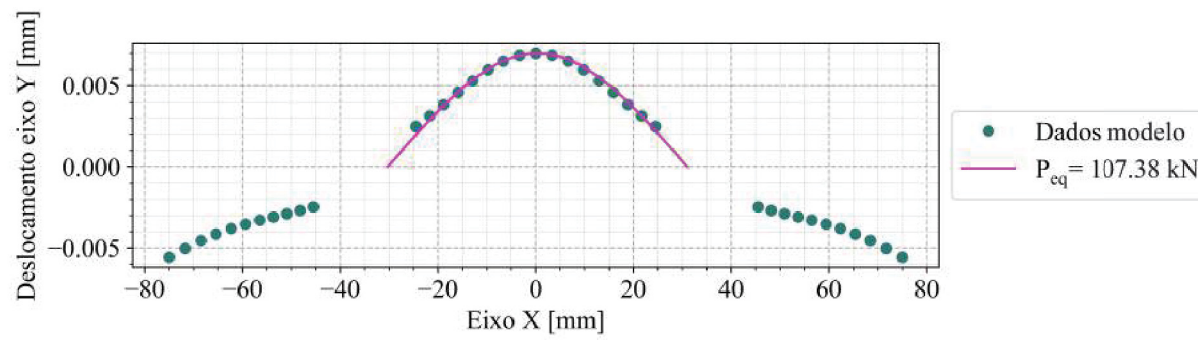


FIGURA 144 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS400x35_4 ϕ 19_ch22

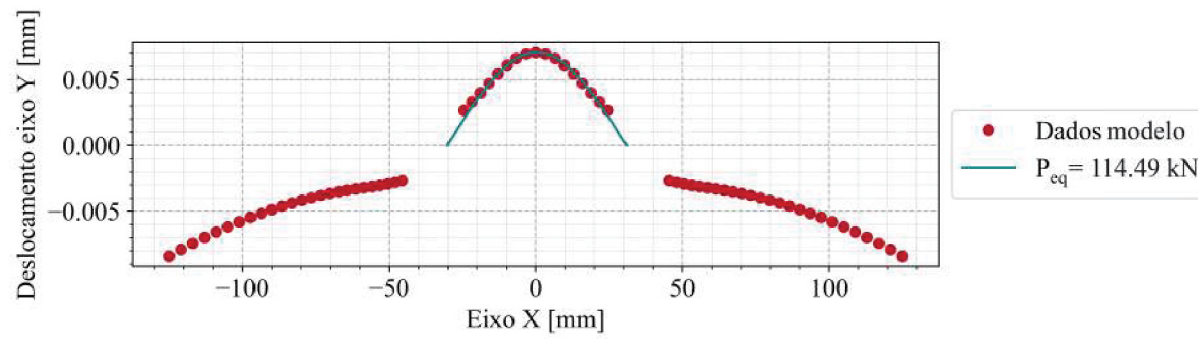


FIGURA 145 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS400x35_4 ϕ 19_ch22

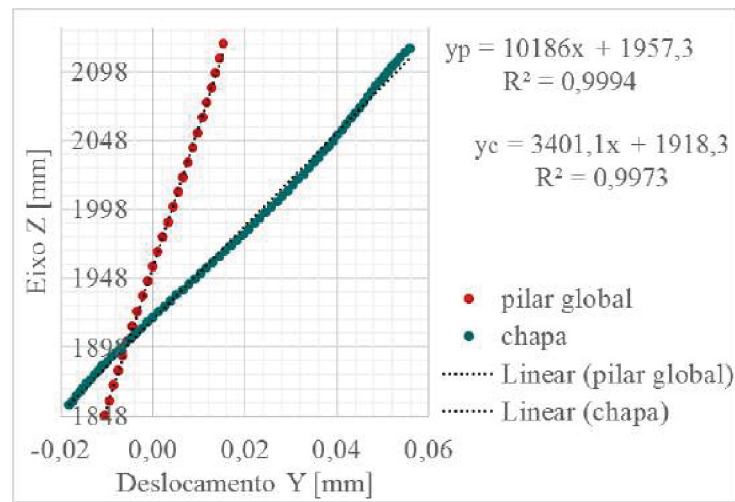
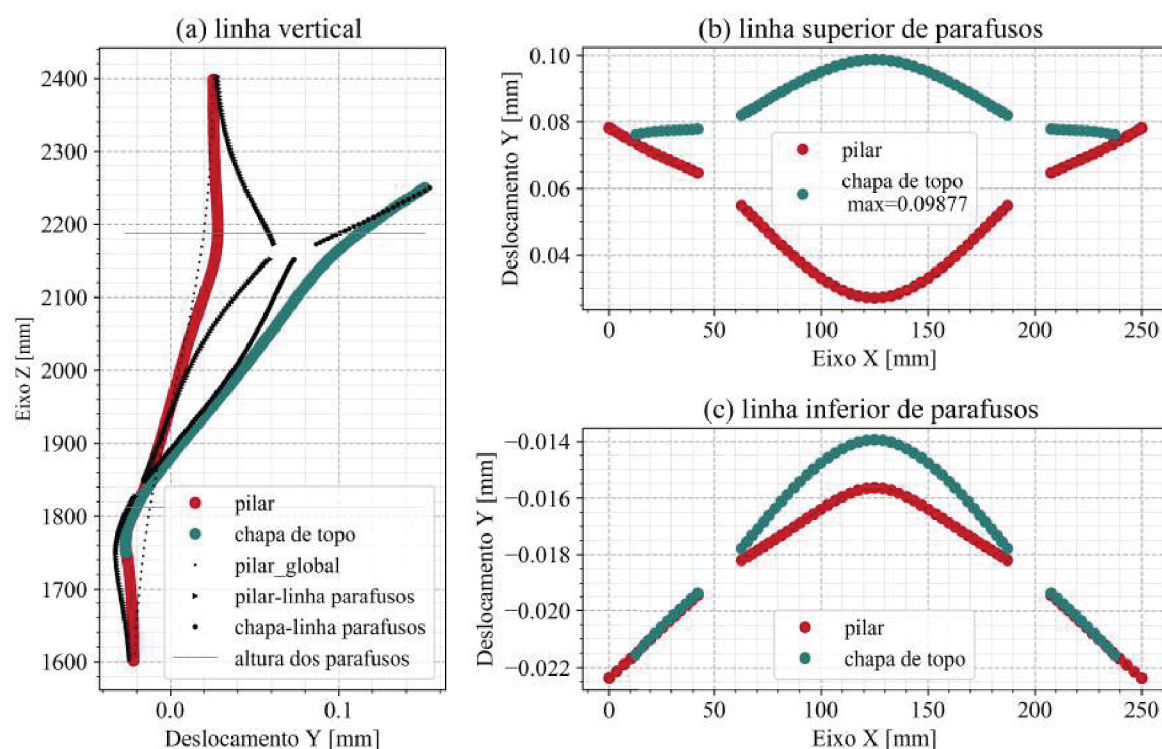
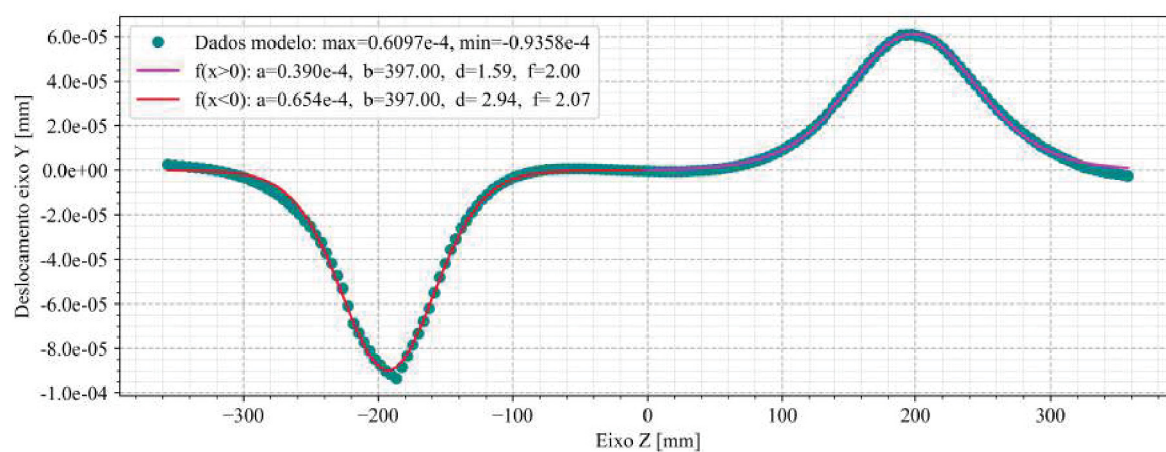


FIGURA 146 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x118_VS400x35_4 ϕ 19_ch22

CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22FIGURA 147 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22FIGURA 148 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22

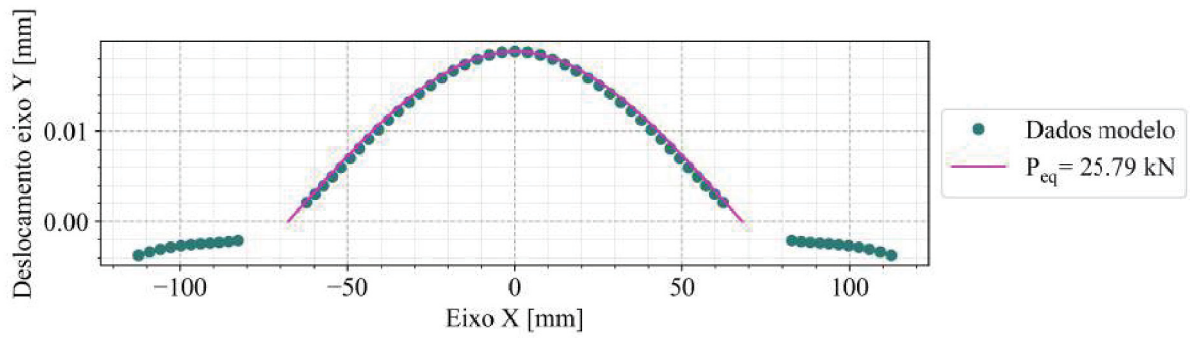


FIGURA 149 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22

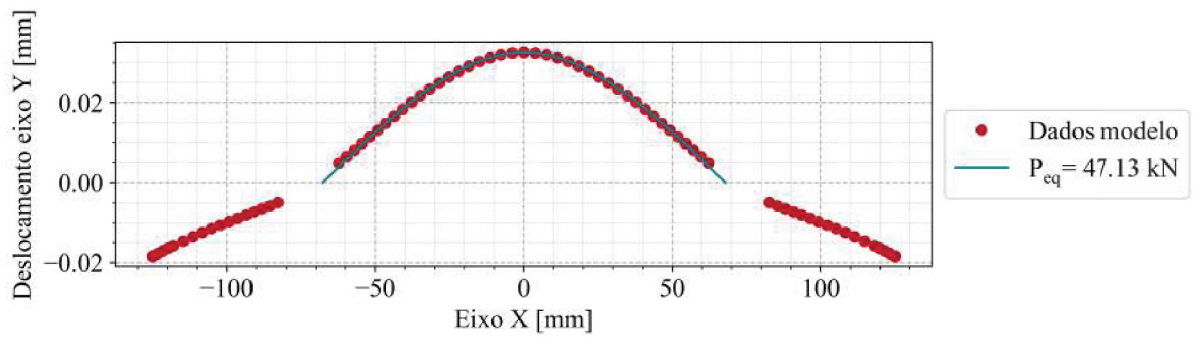


FIGURA 150 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22

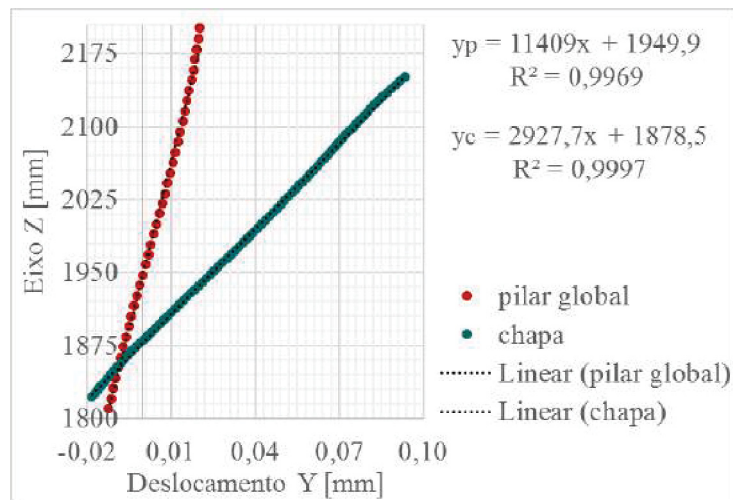
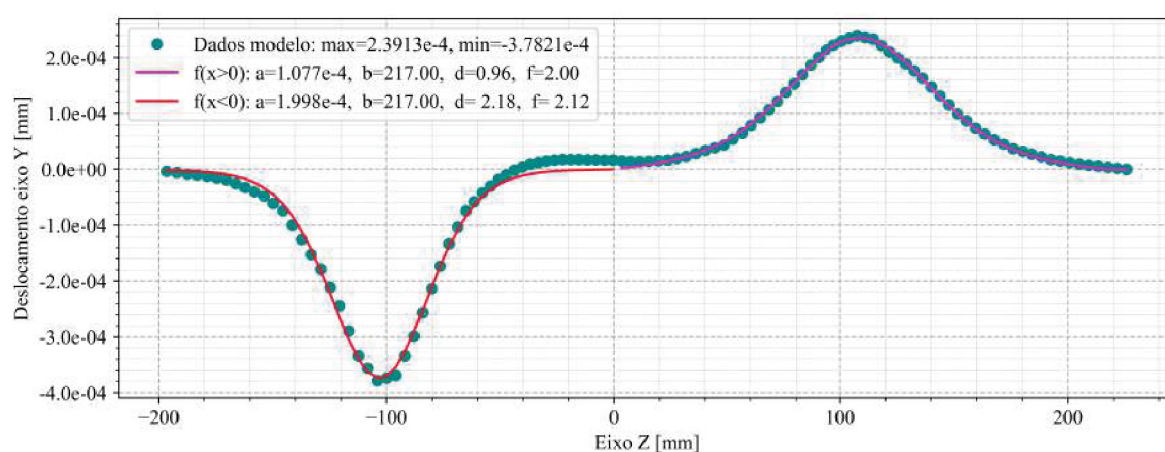
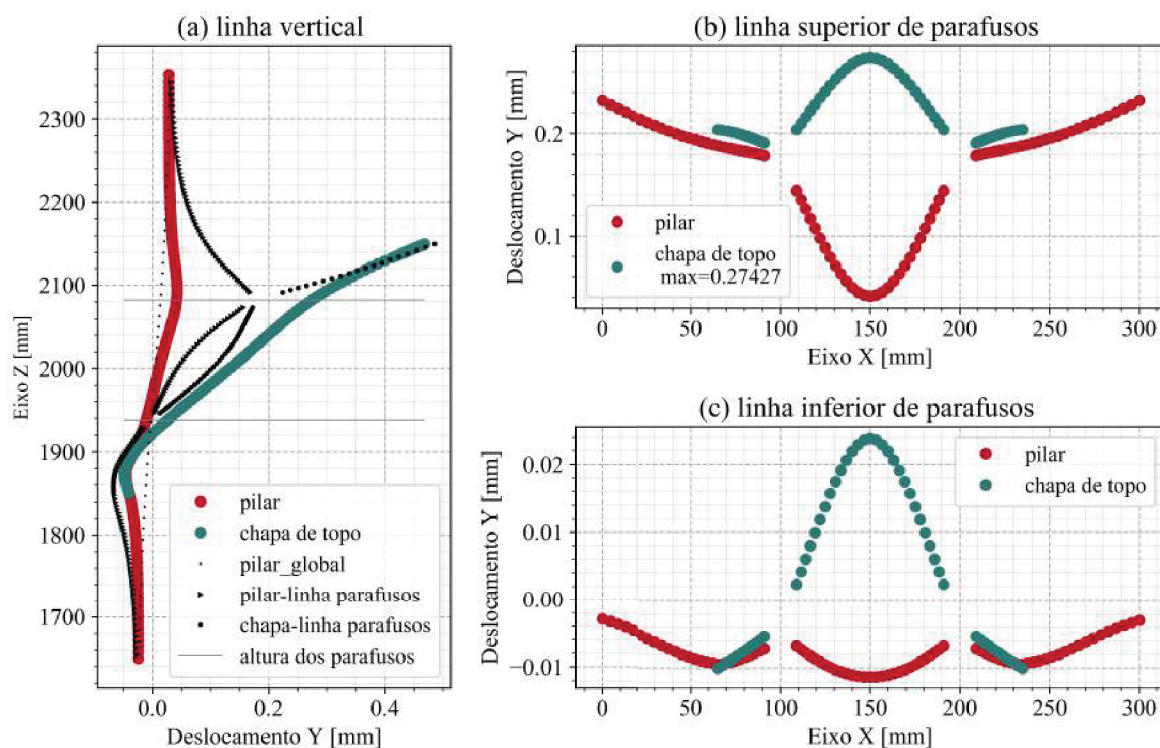


FIGURA 151 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS350x118_VS450x71_4 ϕ 19_ch22

B.4 Ligações Feitas com pilares de 400 milímetros de altura

CVS400x87_VS250x32_4 ϕ 16_ch12



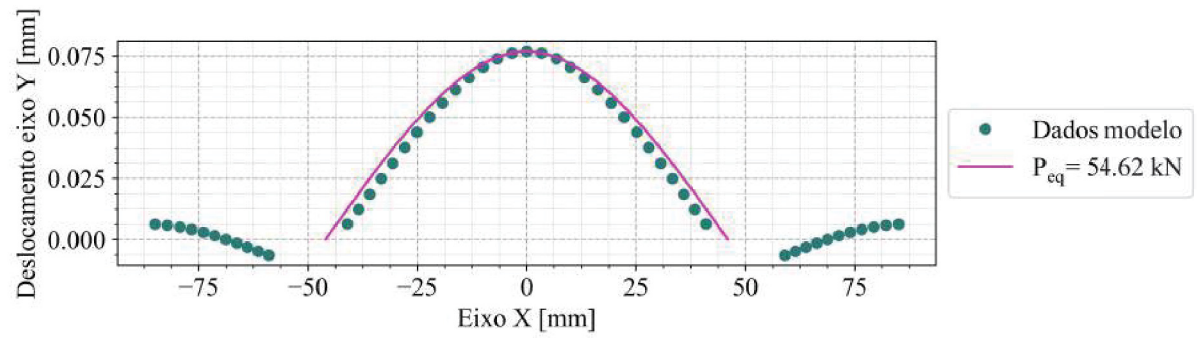


FIGURA 154 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12

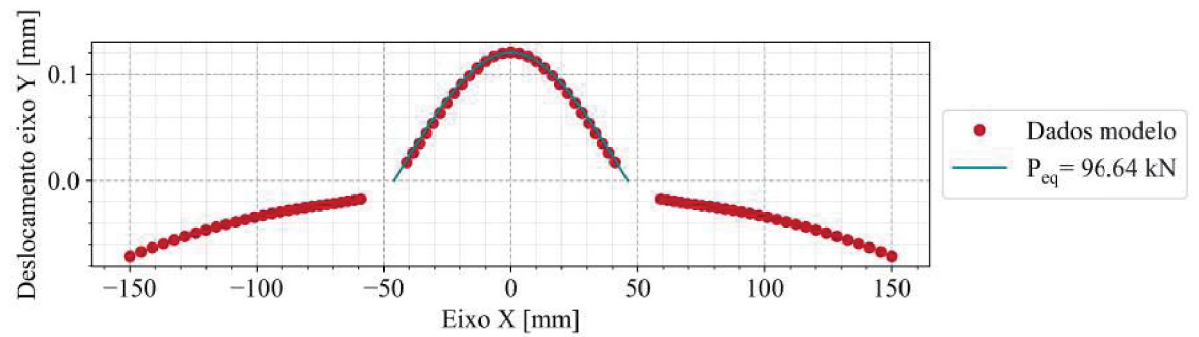


FIGURA 155 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12

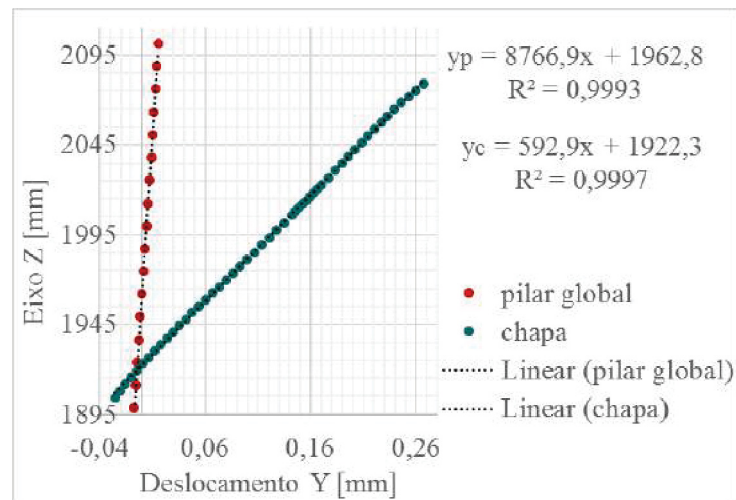


FIGURA 156 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS250x32_4φ16_ch12

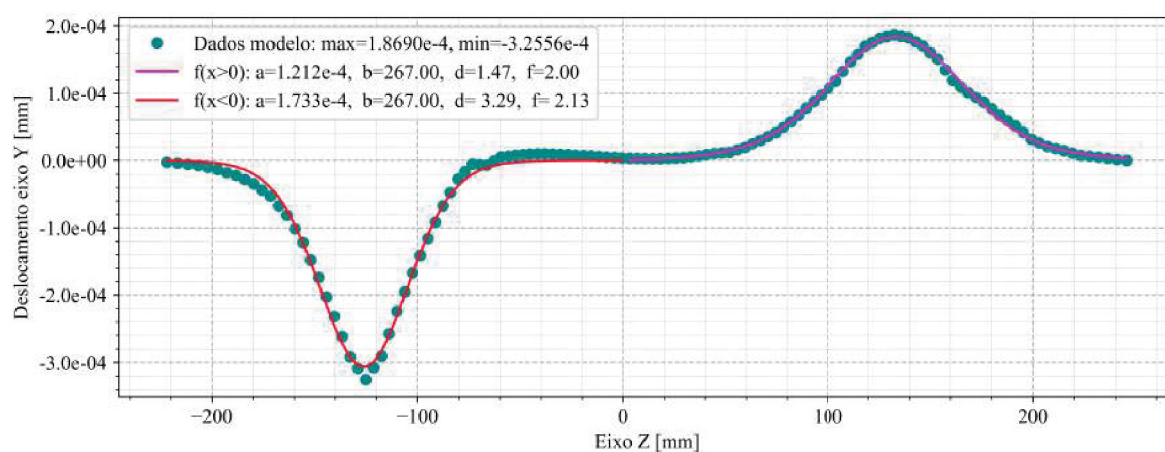


FIGURA 158 – Deformação local da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

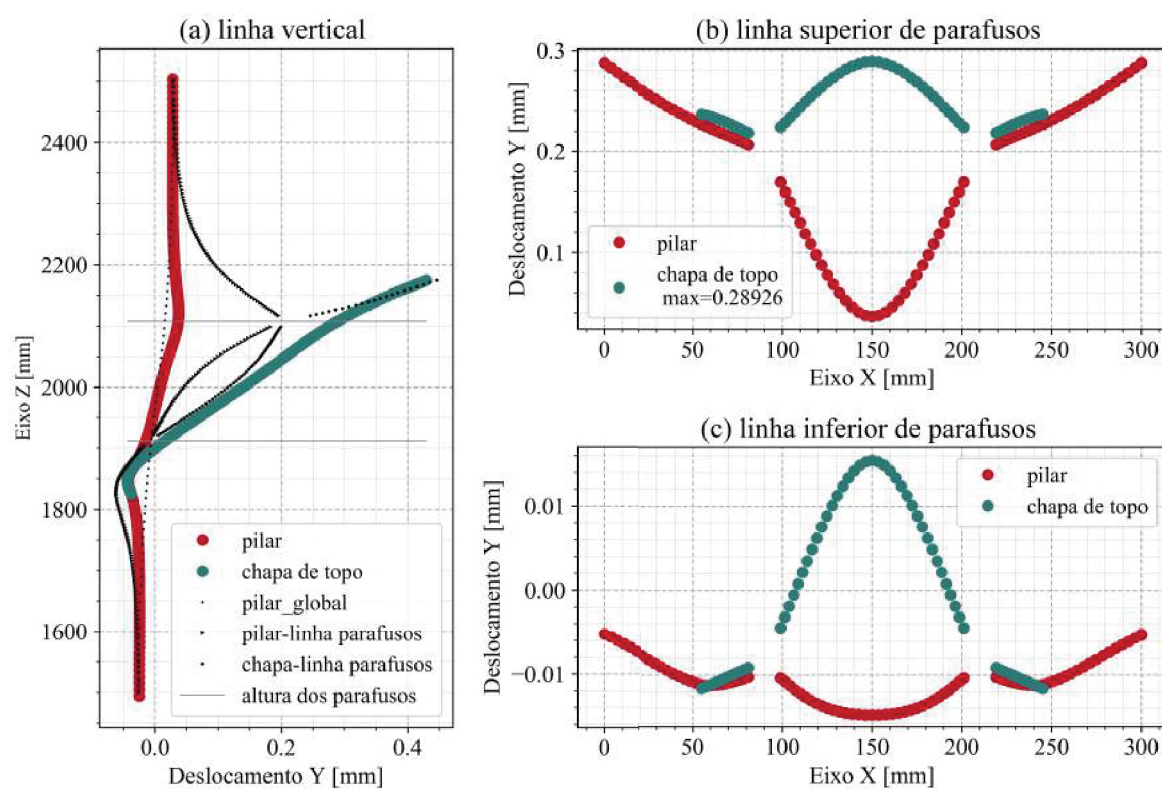


FIGURA 157 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

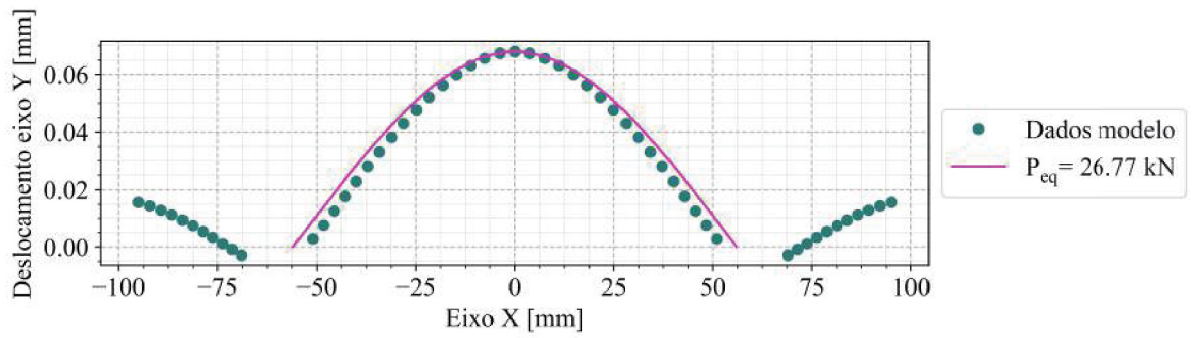


FIGURA 159 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

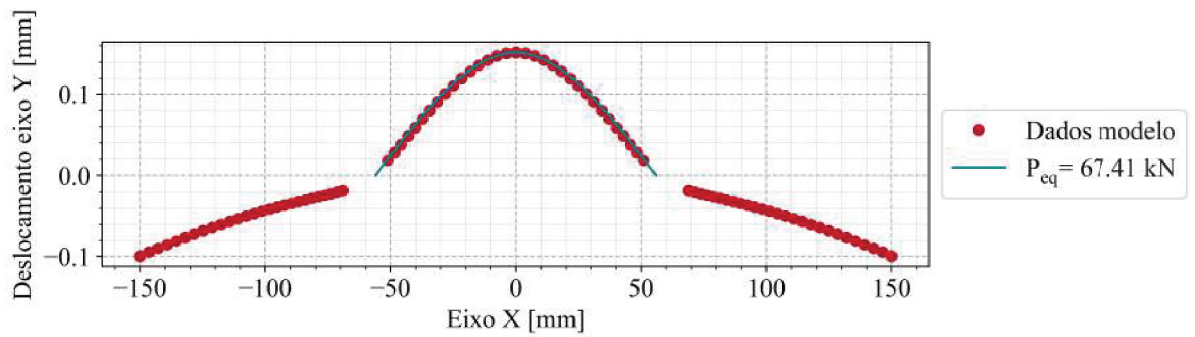


FIGURA 160 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

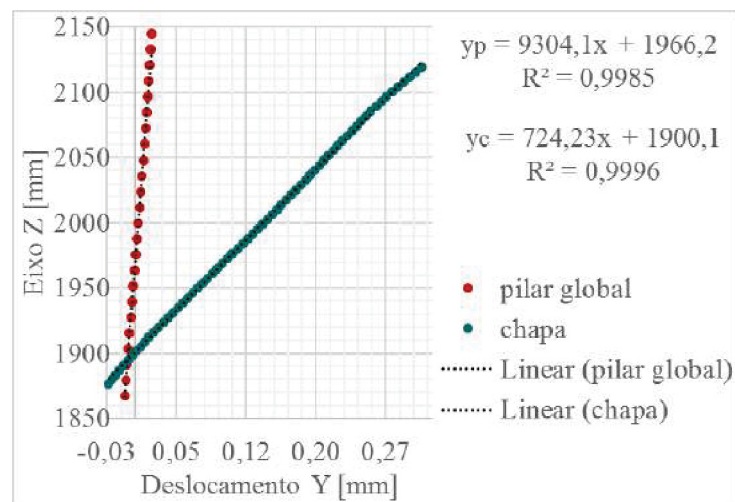


FIGURA 161 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12-g

CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

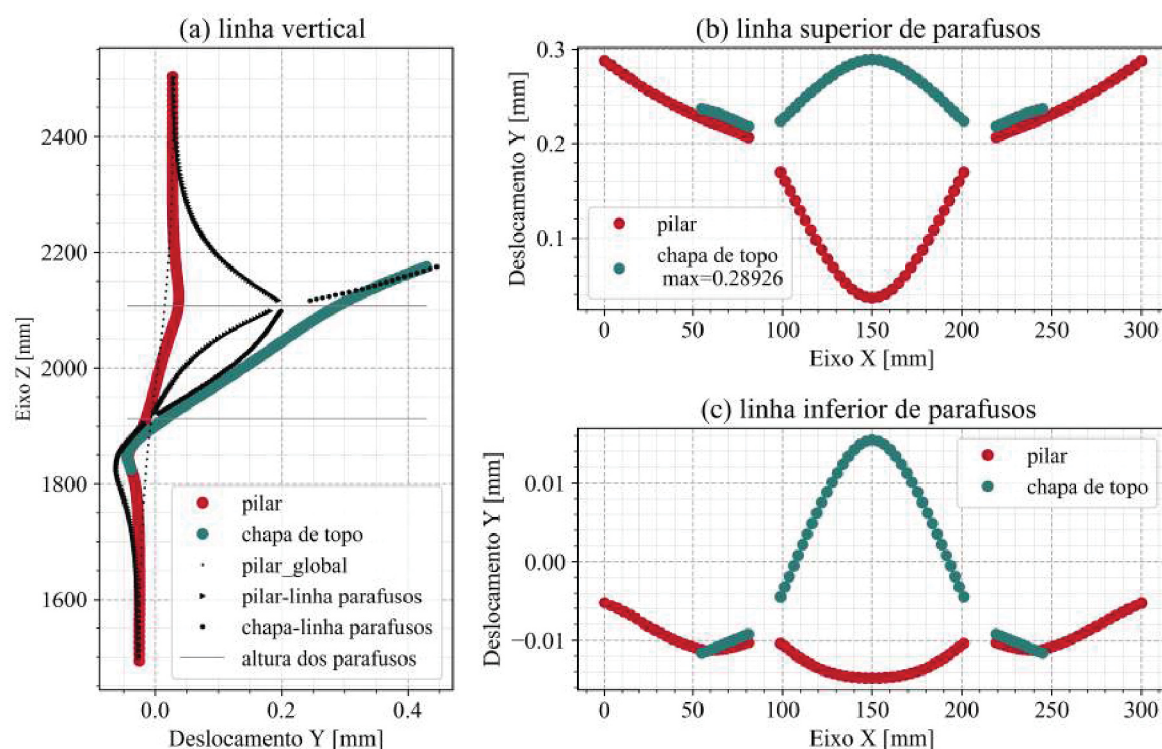


FIGURA 162 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

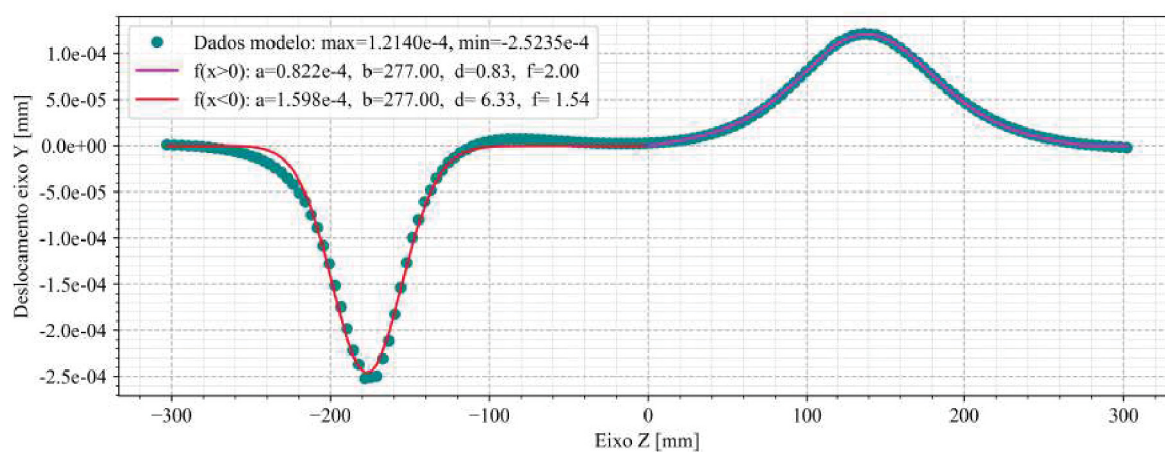


FIGURA 163 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

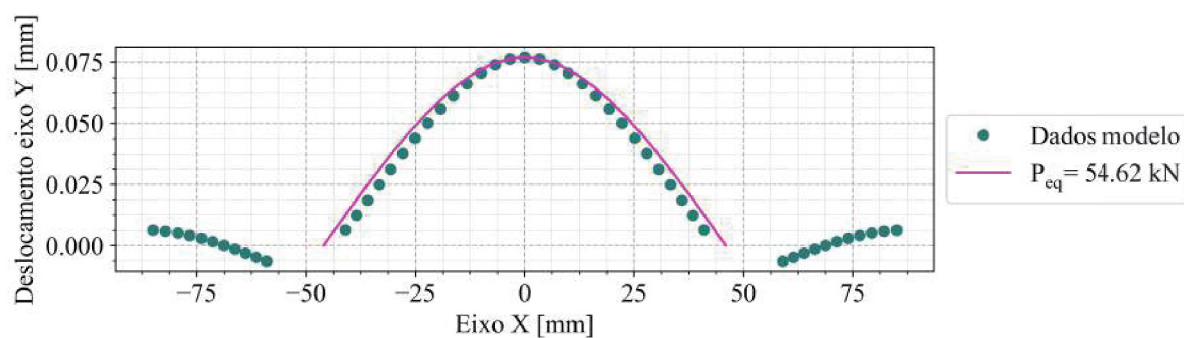


FIGURA 164 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

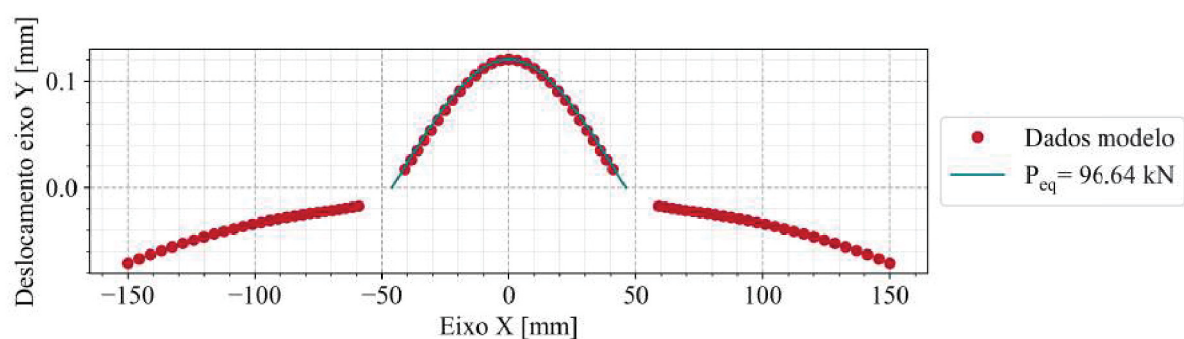


FIGURA 165 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

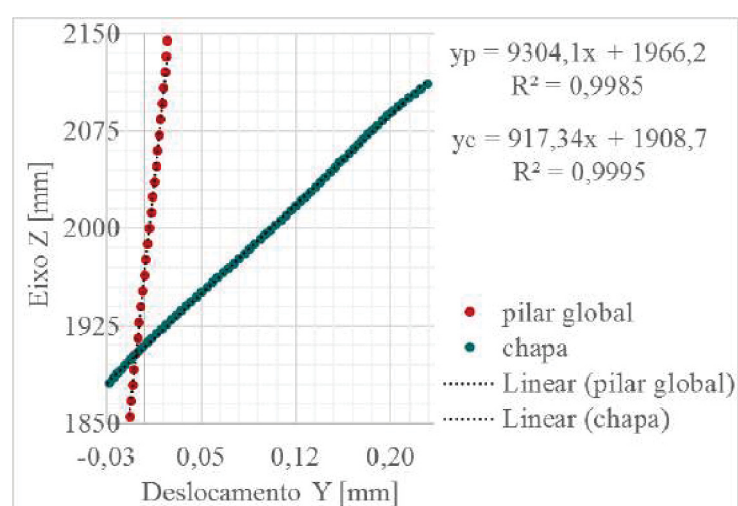
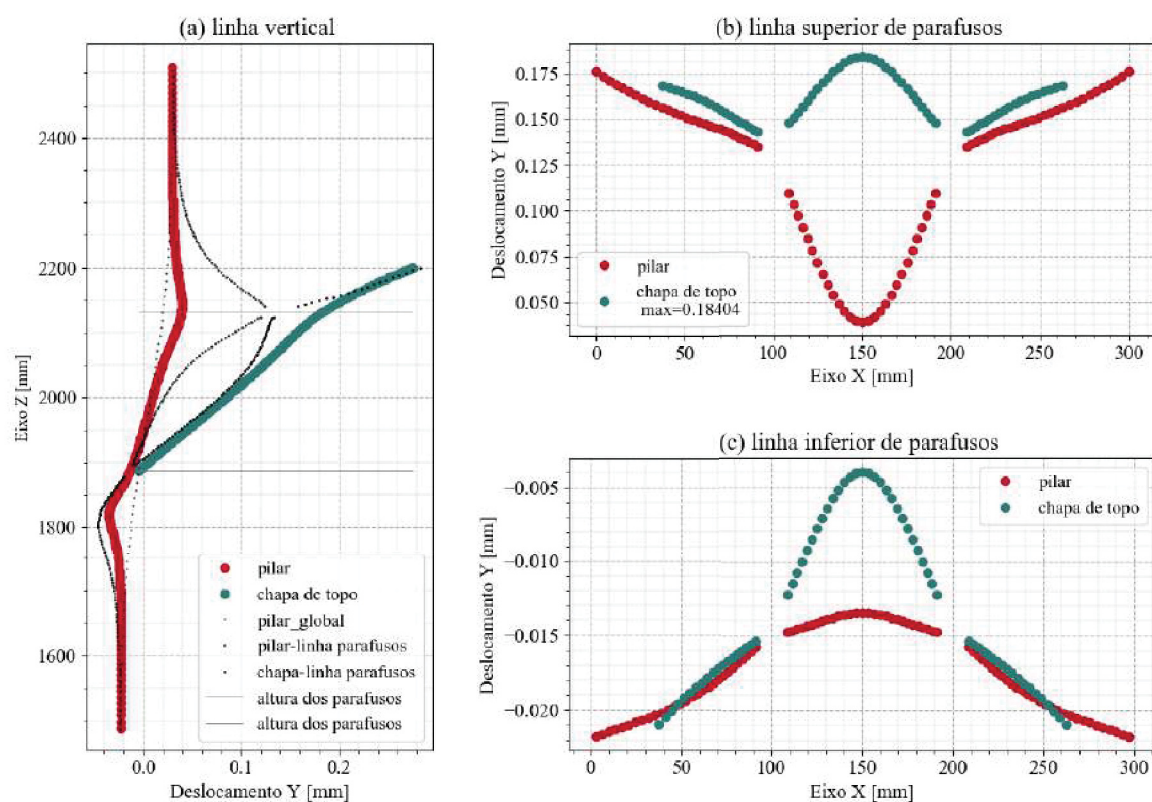
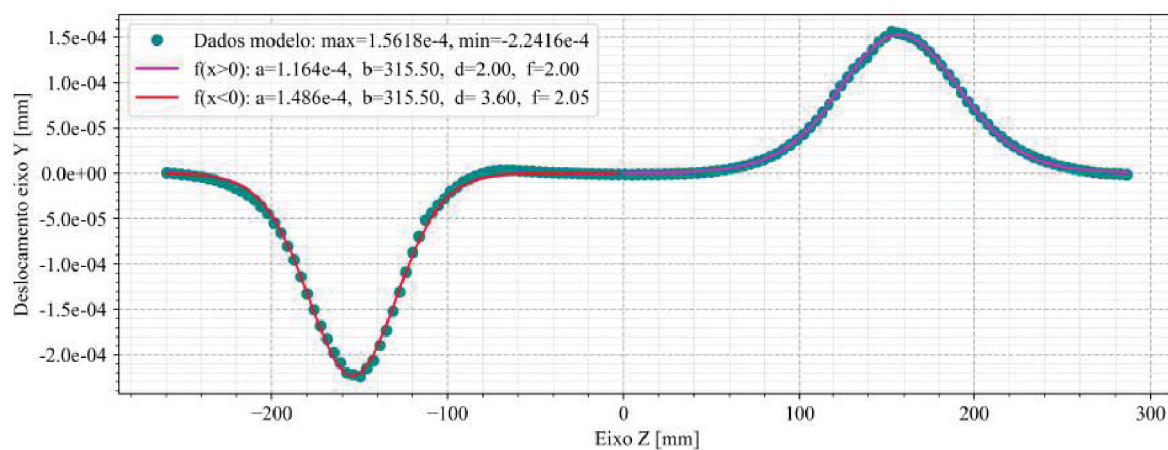


FIGURA 166 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS300x46_4φ16_ch12

CVS400x87_VS350x51_4 ϕ 16_ch12-gFIGURA 167 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS350x51_4 ϕ 16_ch12-gFIGURA 168 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS350x51_4 ϕ 16_ch12-g

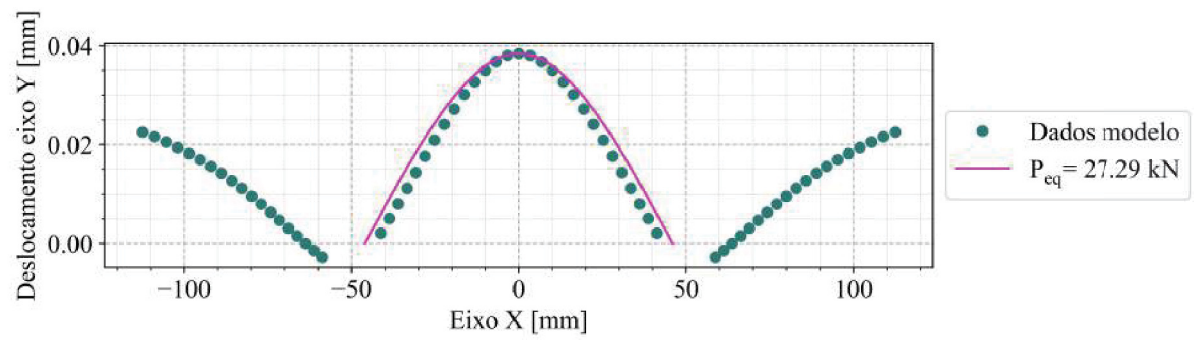


FIGURA 169 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g

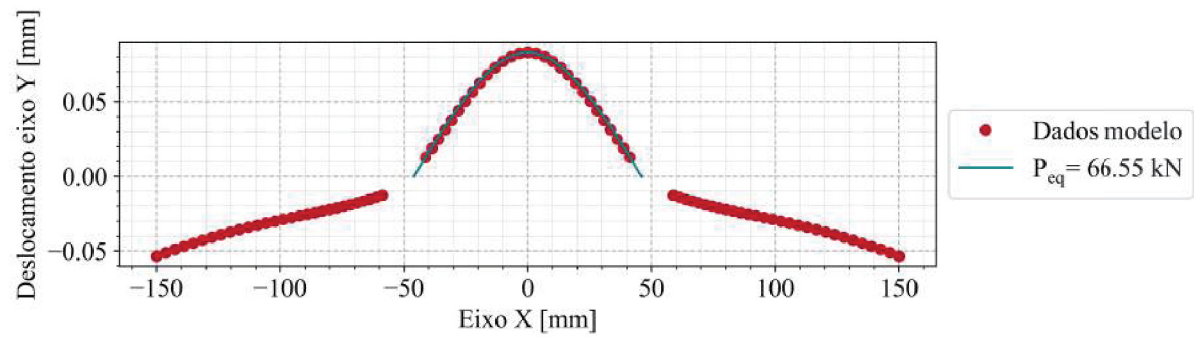


FIGURA 170 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g

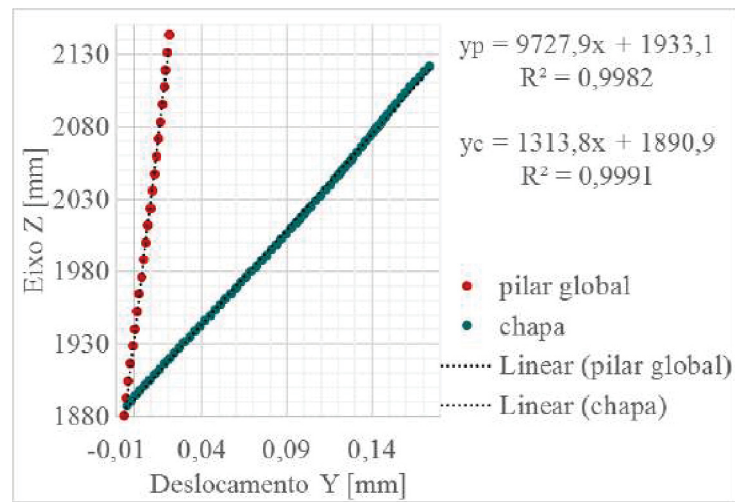


FIGURA 171 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12-g

CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

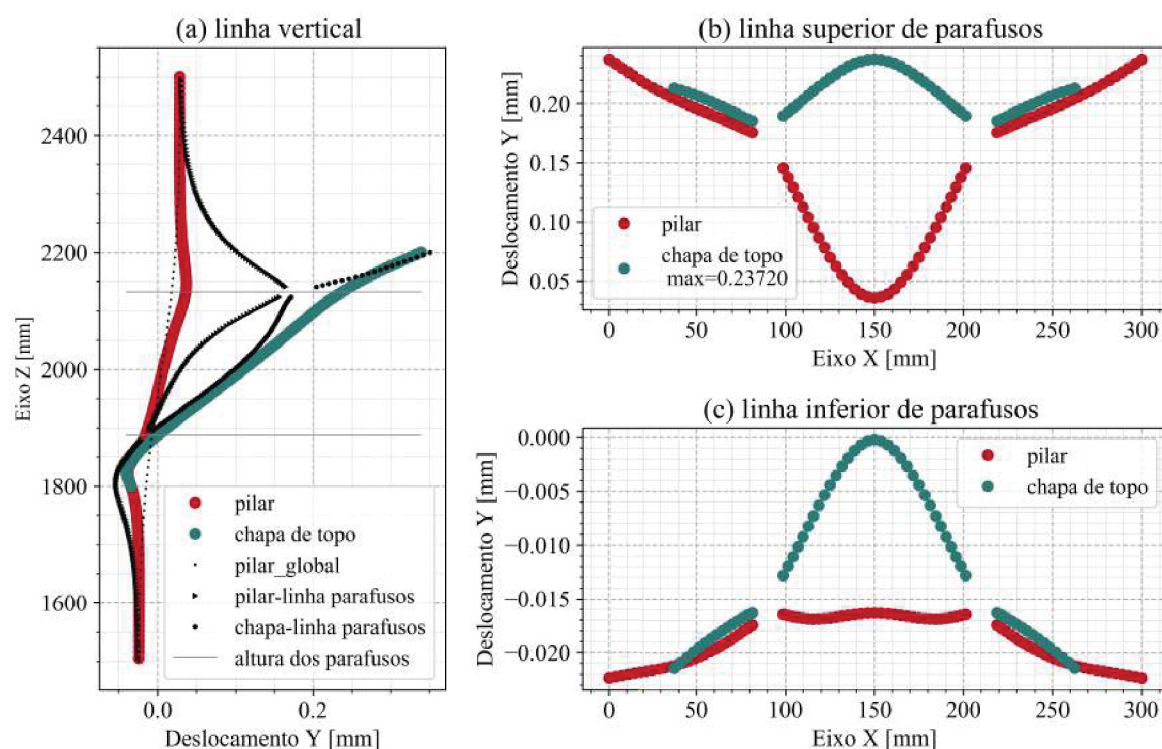


FIGURA 172 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

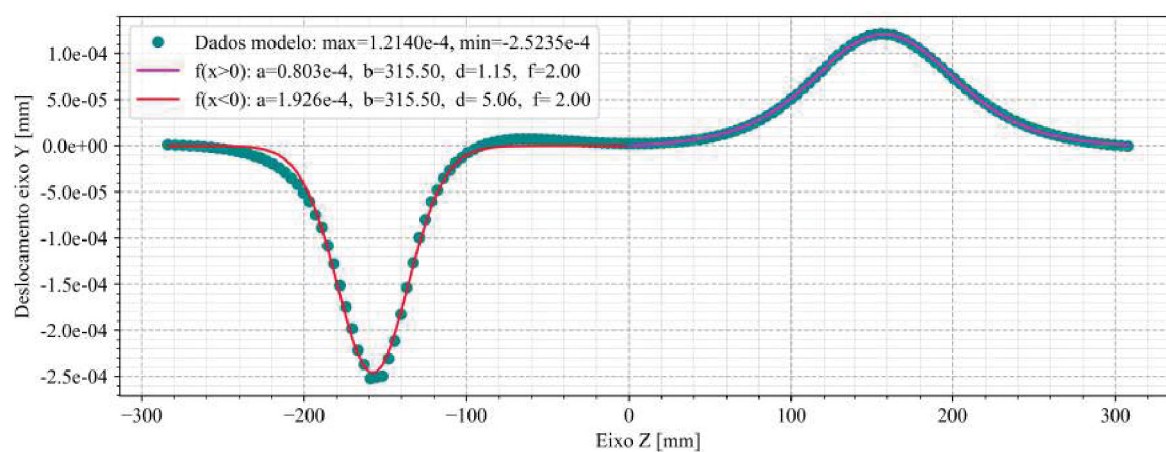


FIGURA 173 – Deslocamentos apresentados pela ligação Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

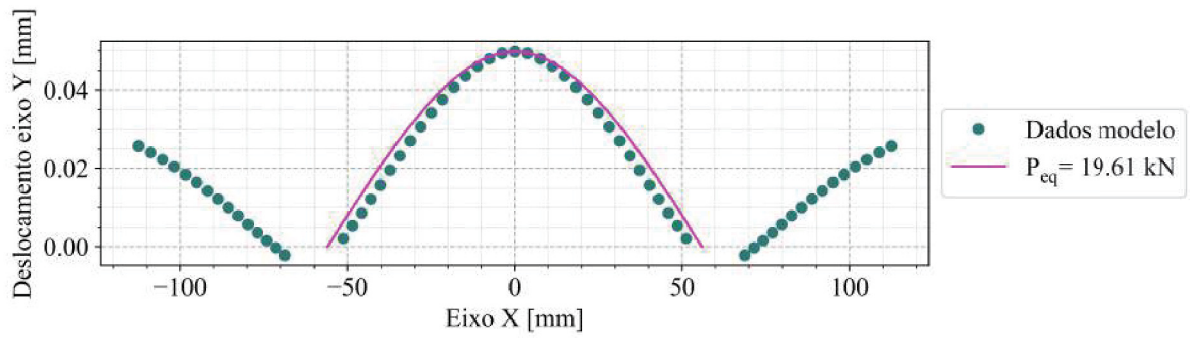


FIGURA 174 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

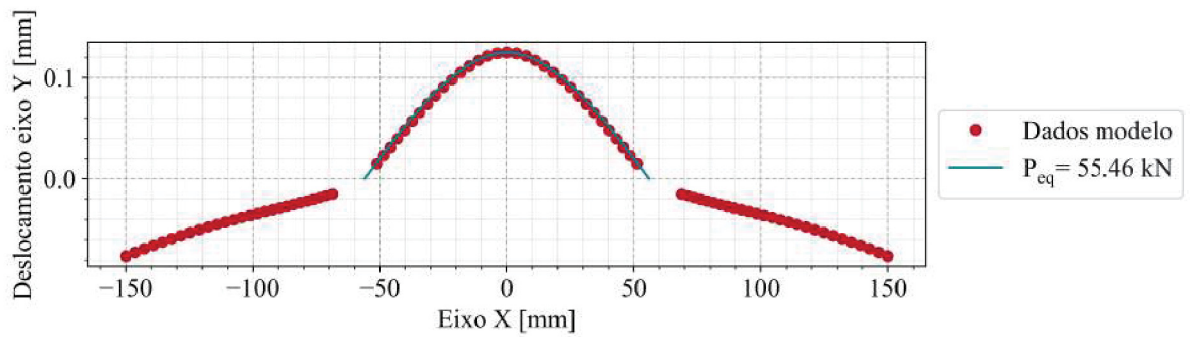


FIGURA 175 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

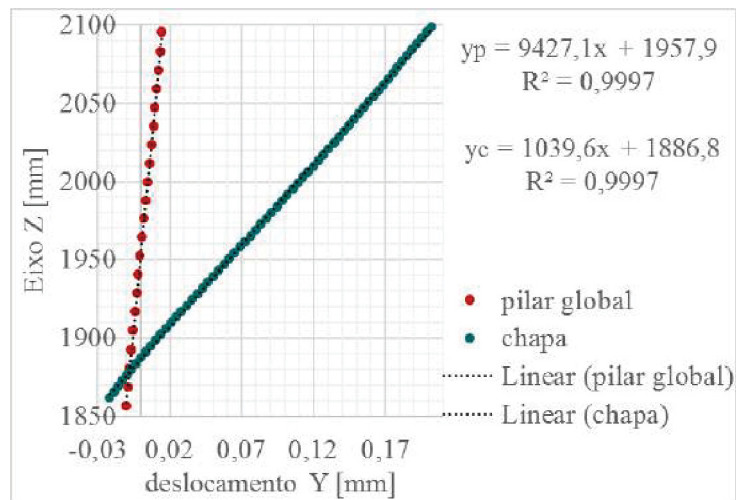
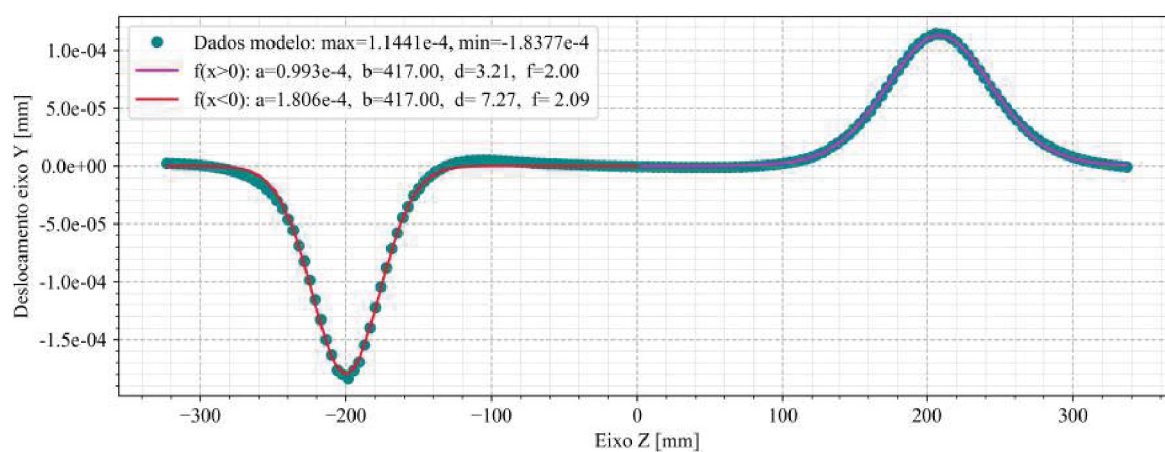
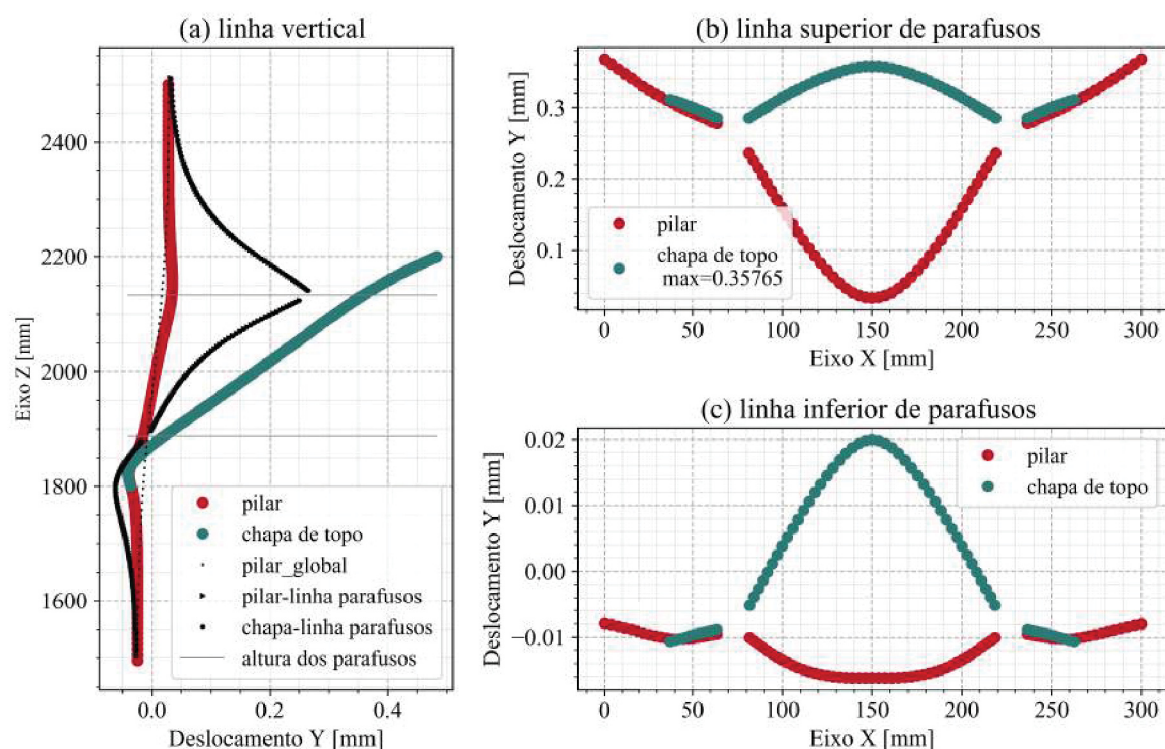


FIGURA 176 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS350x51_4φ16_ch12

CVS400x87_VS350x51_4 ϕ 16_ch12+g



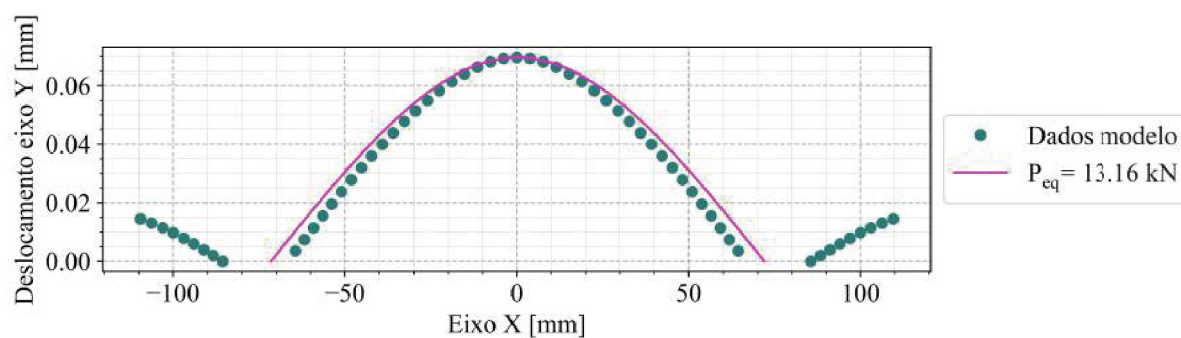


FIGURA 179 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

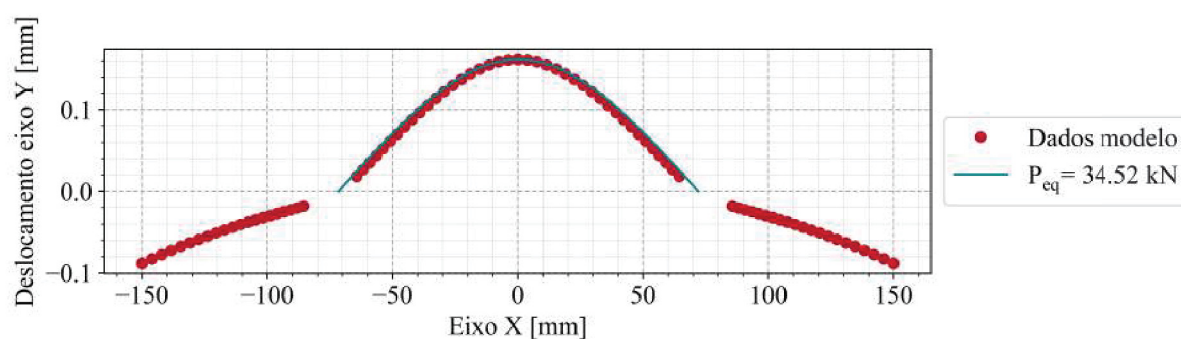


FIGURA 180 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

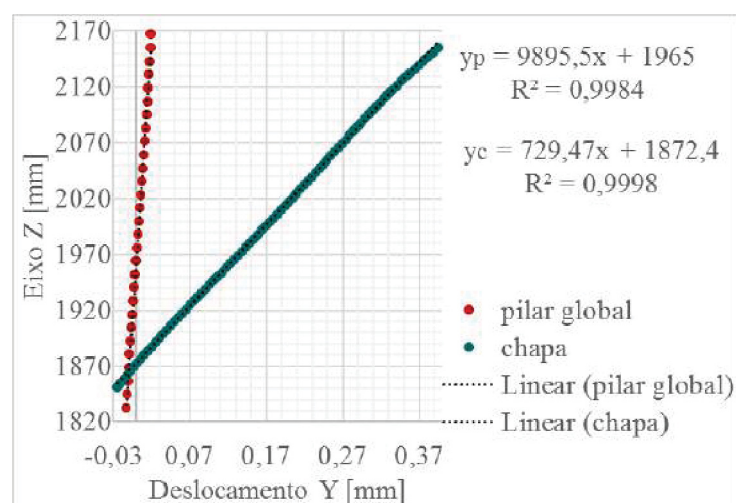


FIGURA 181 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

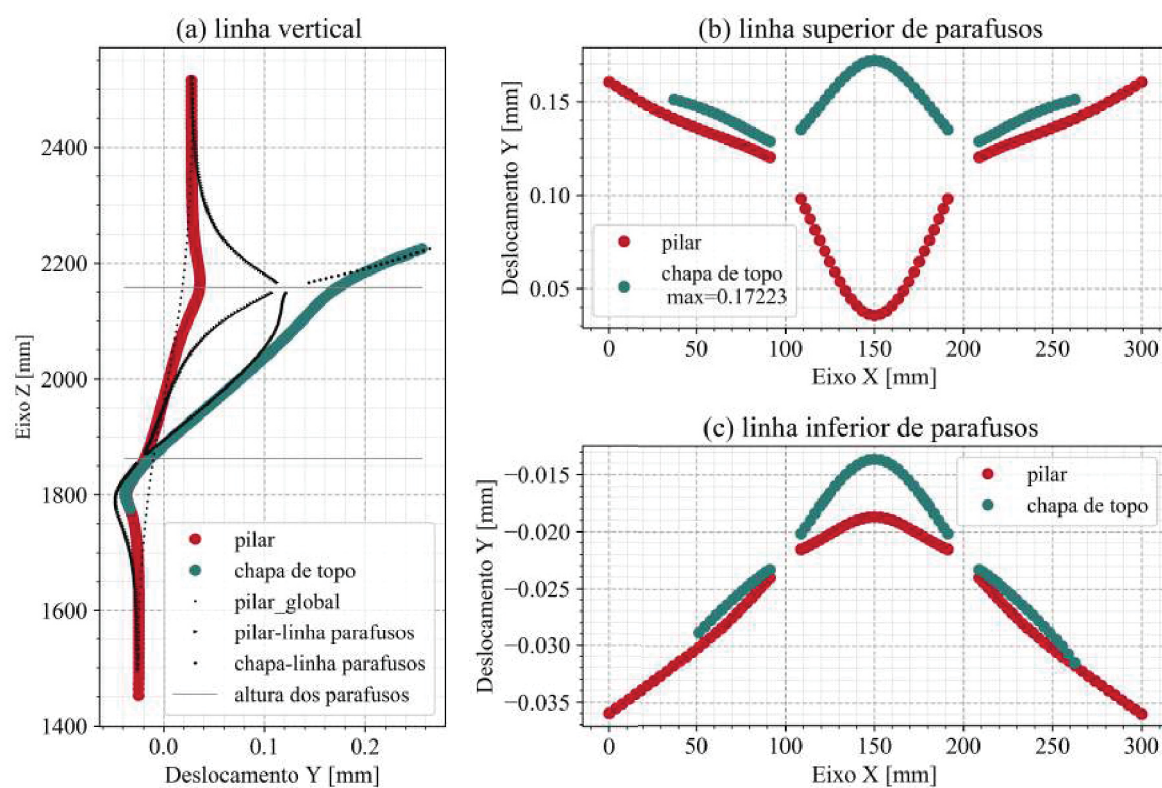


FIGURA 182 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

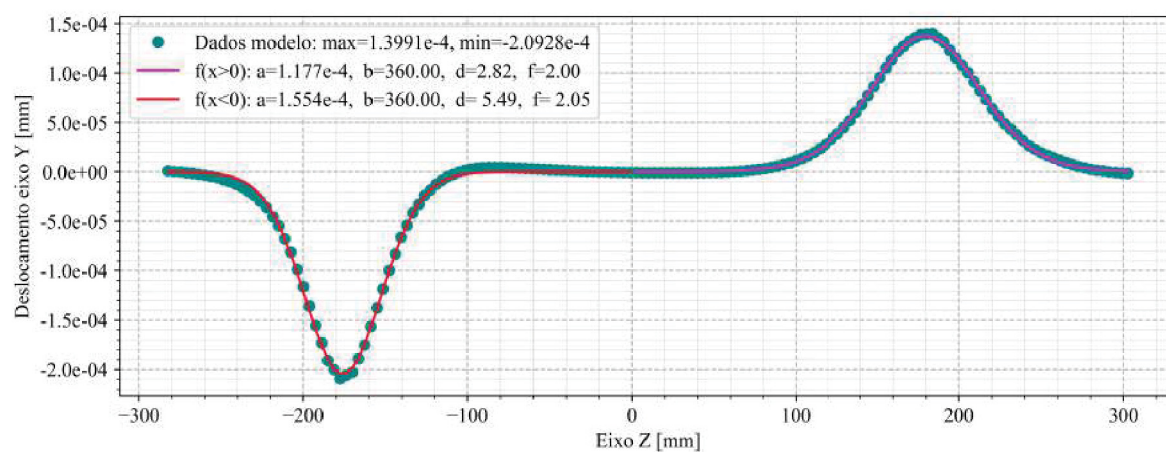


FIGURA 183 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

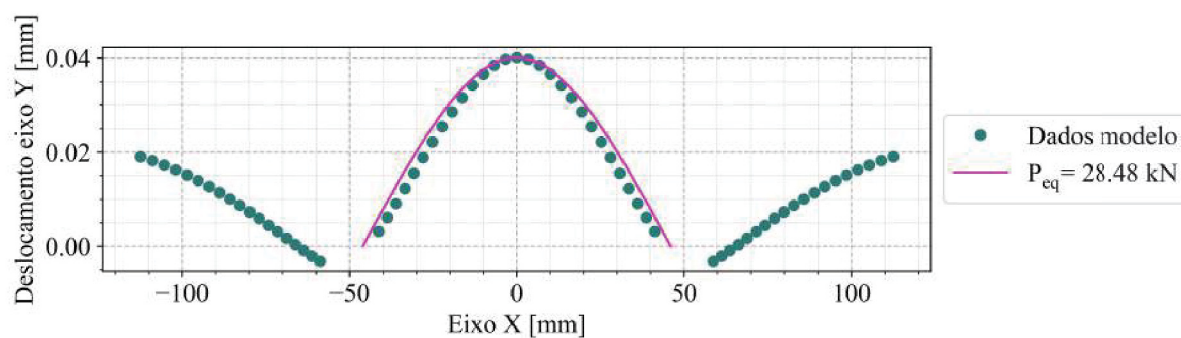


FIGURA 184 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

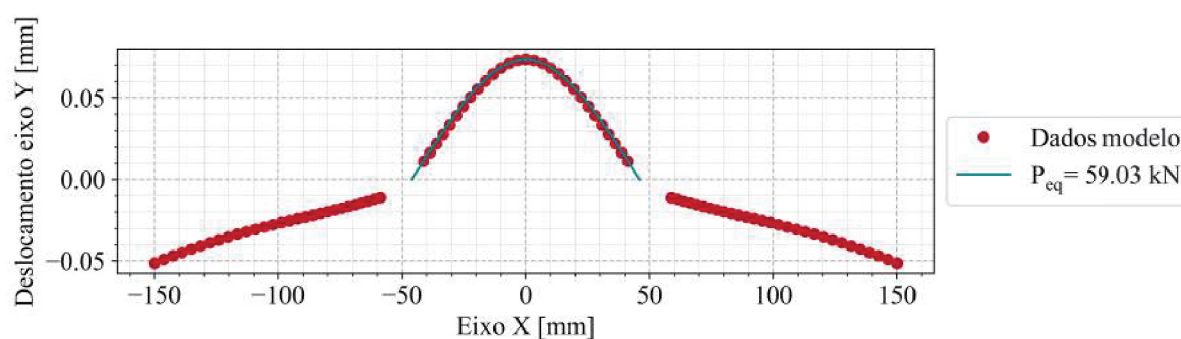


FIGURA 185 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

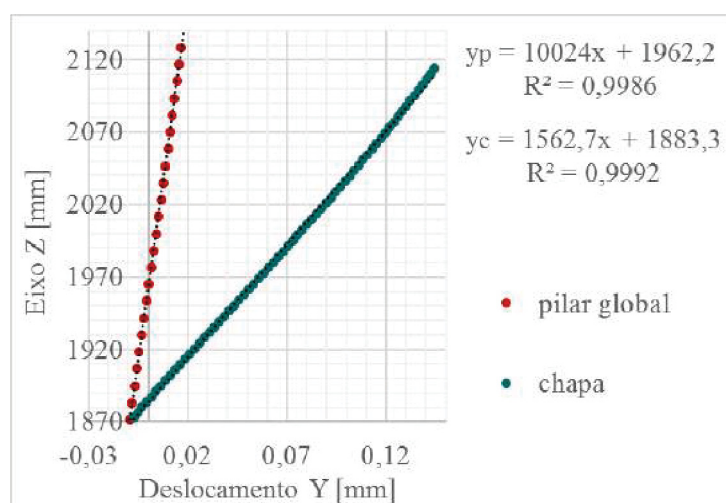
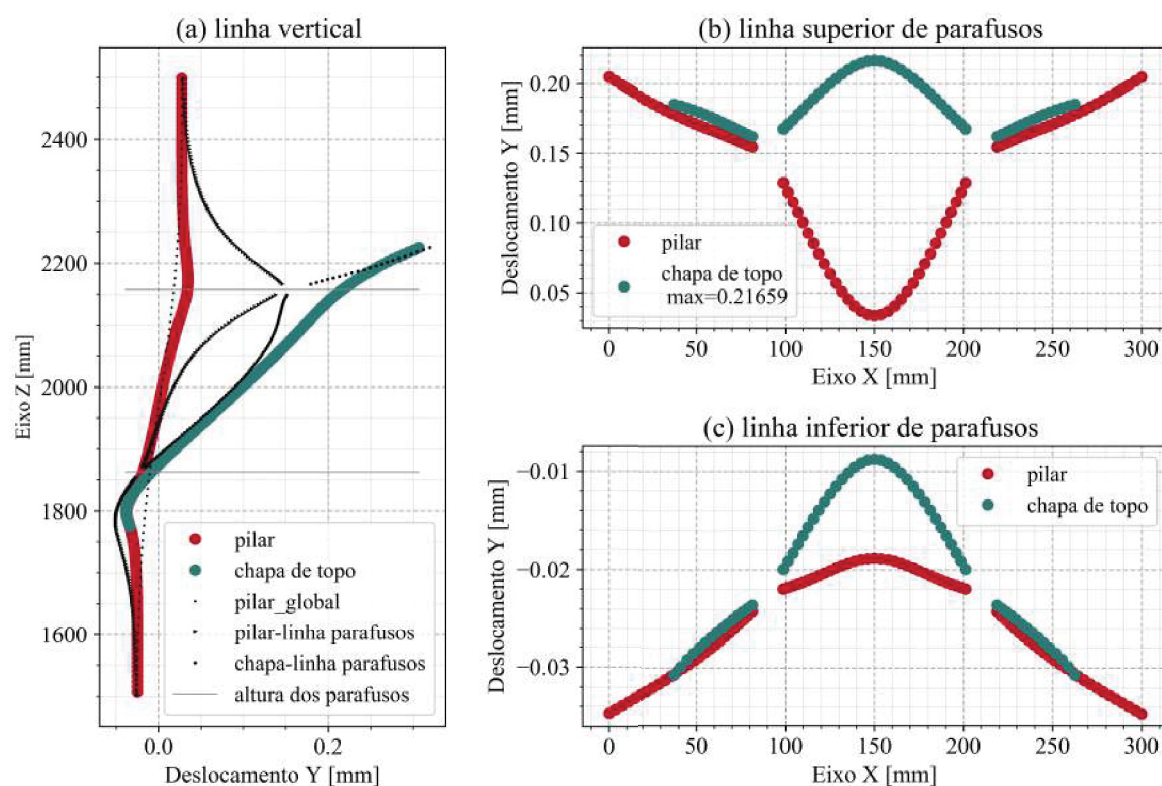
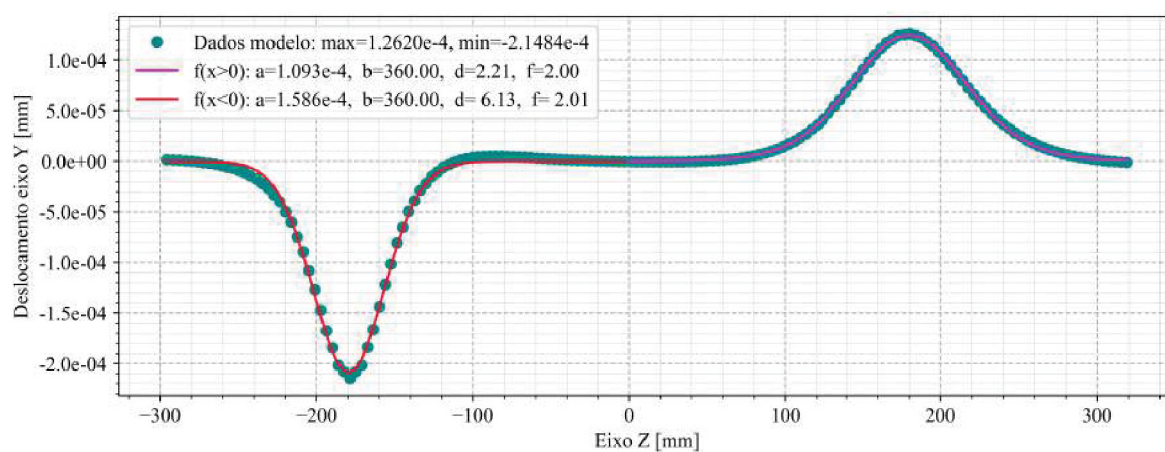


FIGURA 186 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS400x44_4φ16_ch12-g

CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12FIGURA 187 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12FIGURA 188 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12

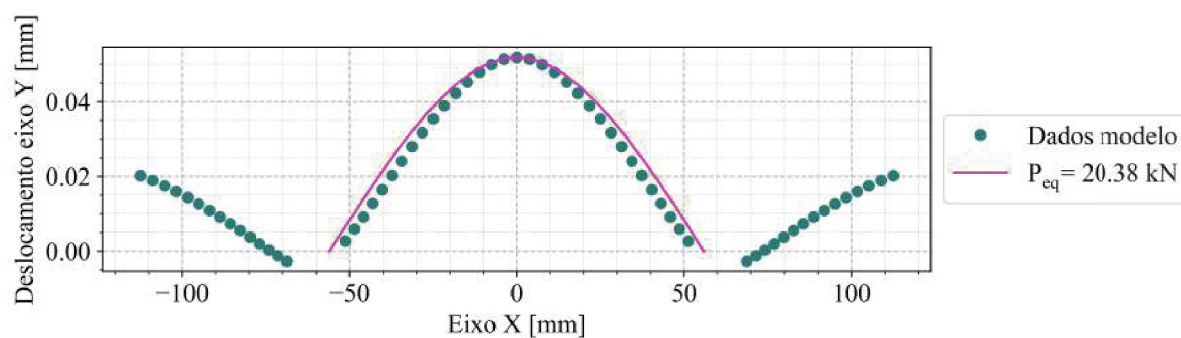


FIGURA 189 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12

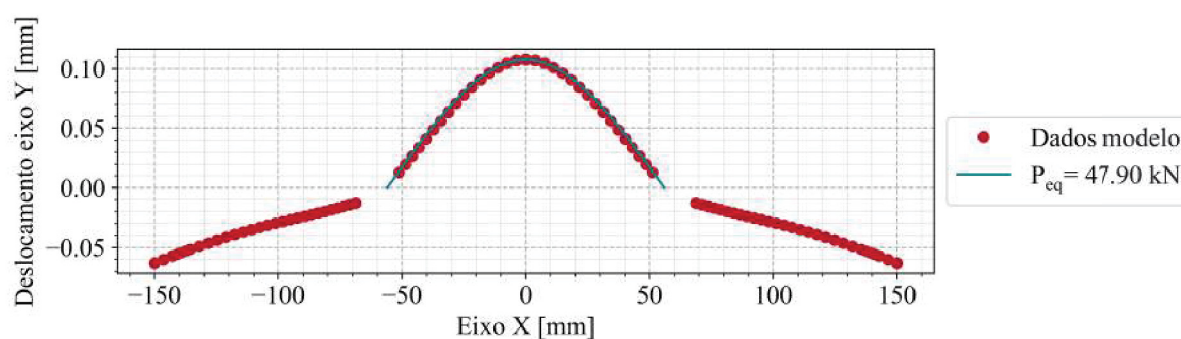


FIGURA 190 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12

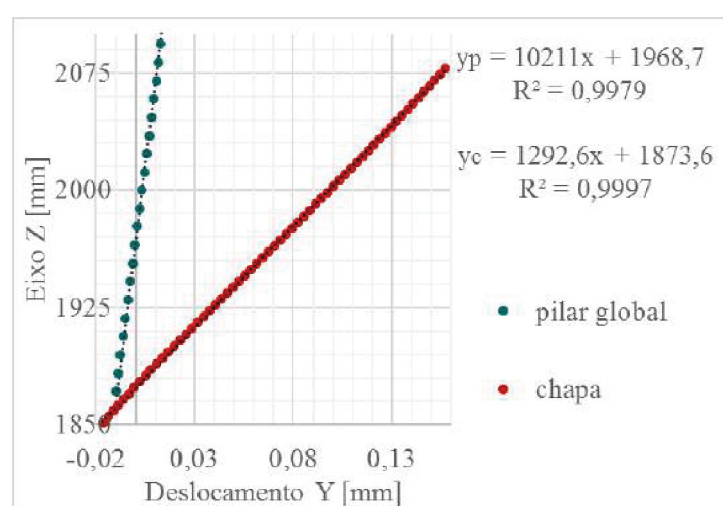
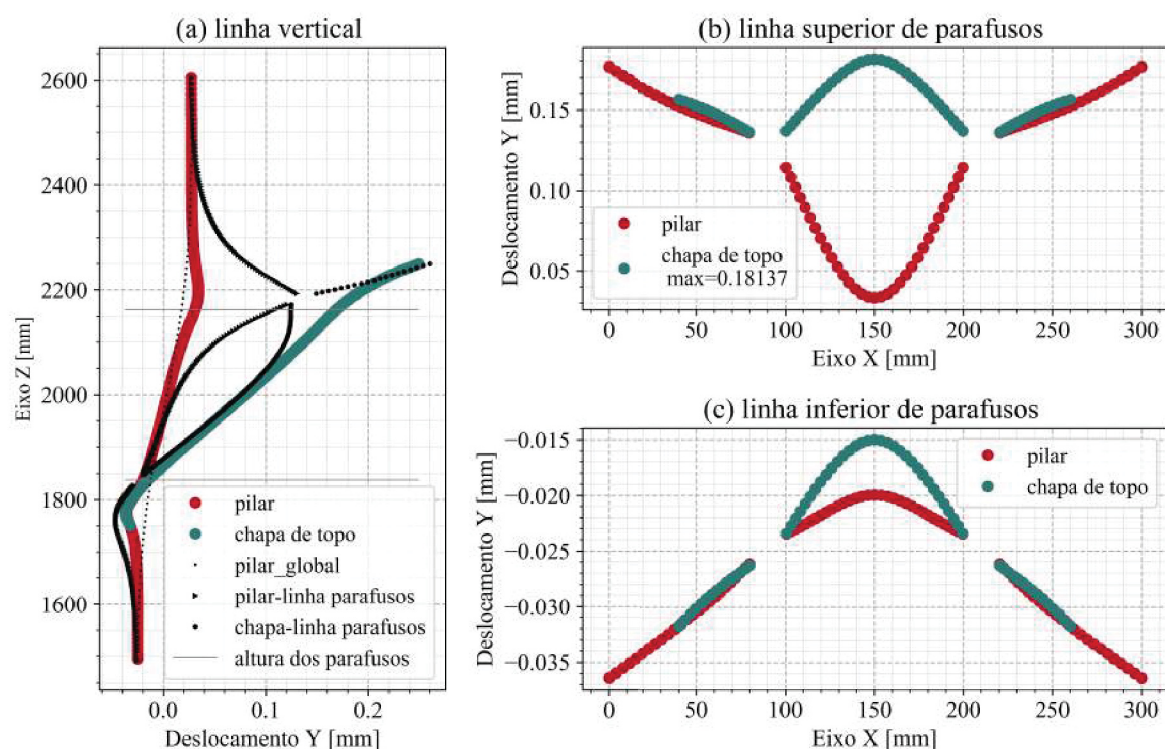
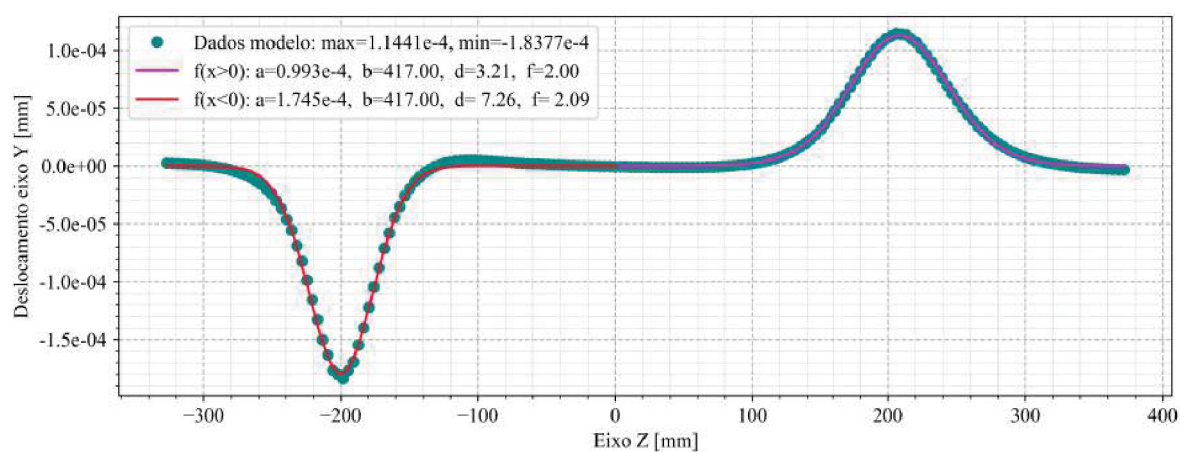


FIGURA 191 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, ligação CVS400x87_VS400x44_4 ϕ 16_ch12

CVS400x87_VS450x51_4 ϕ 19_ch12FIGURA 192 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS450X51_4 ϕ 19_ch12FIGURA 193 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS450X51_4 ϕ 19_ch12

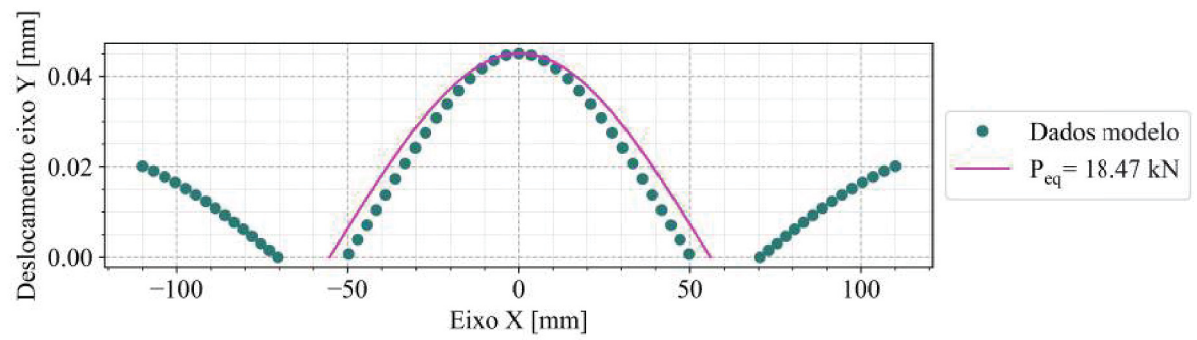


FIGURA 194 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12

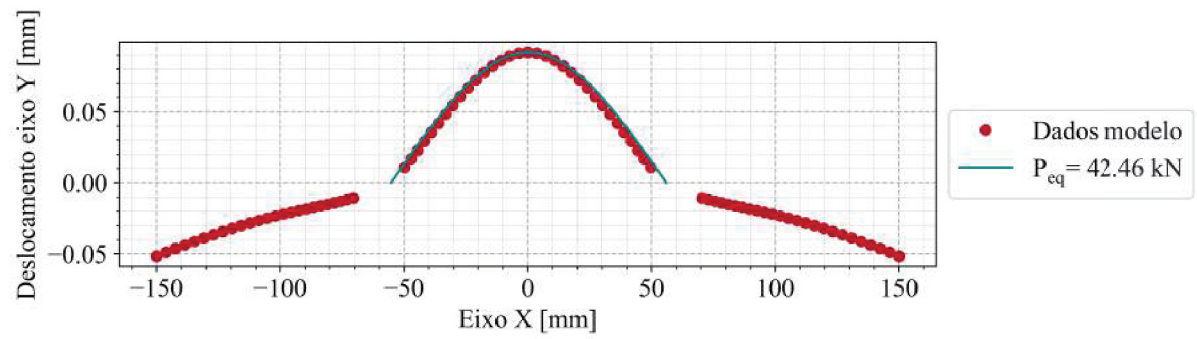


FIGURA 195 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12

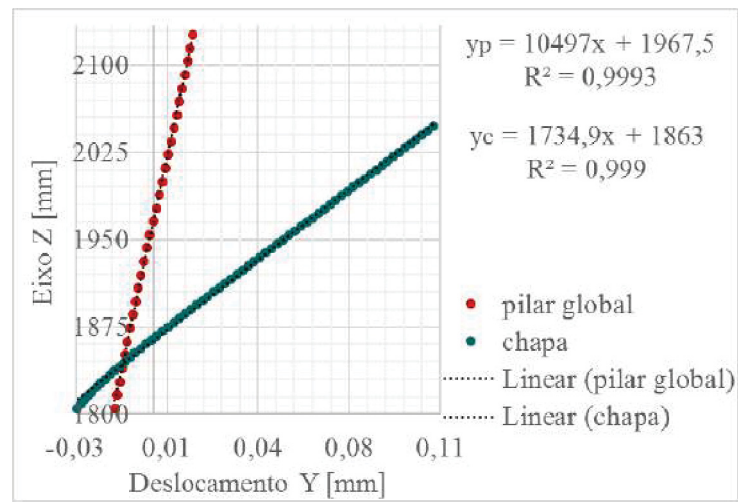
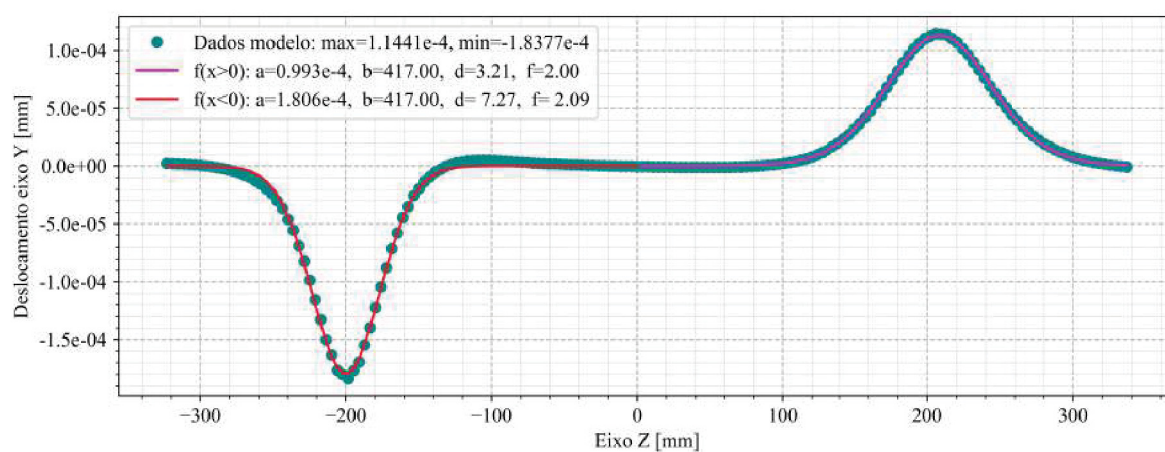
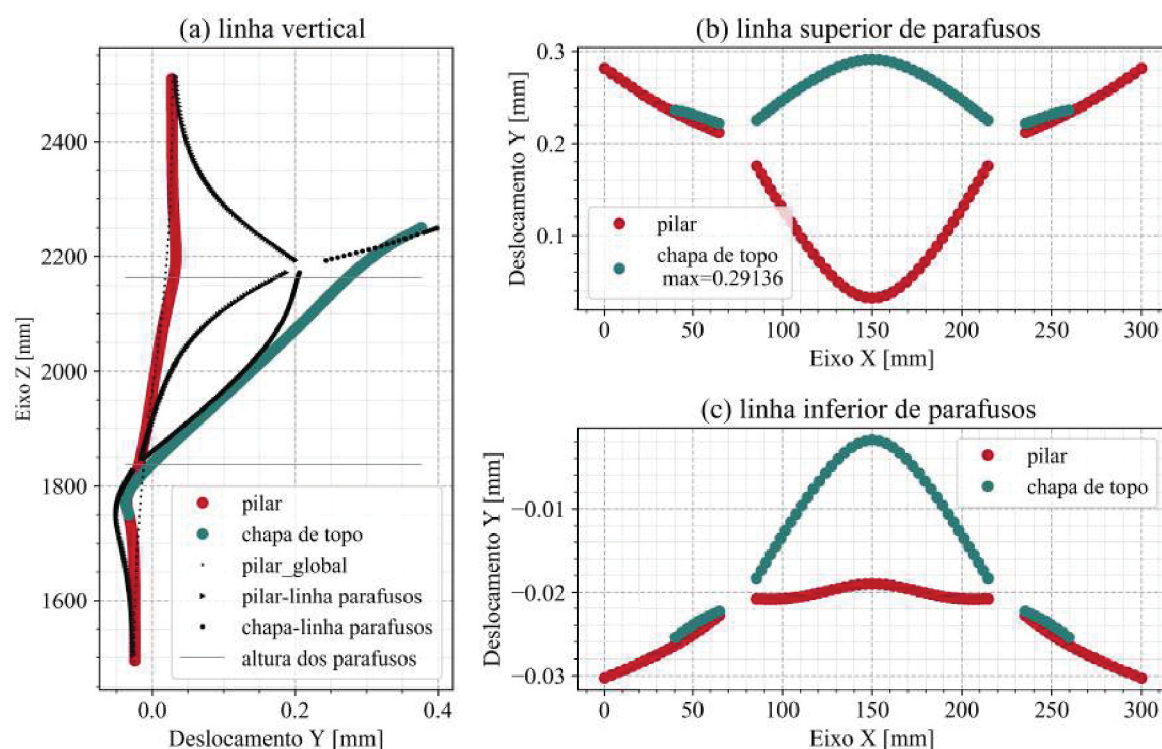


FIGURA 196 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12

CVS400x87_VS450X51_4 ϕ 19_ch12+g



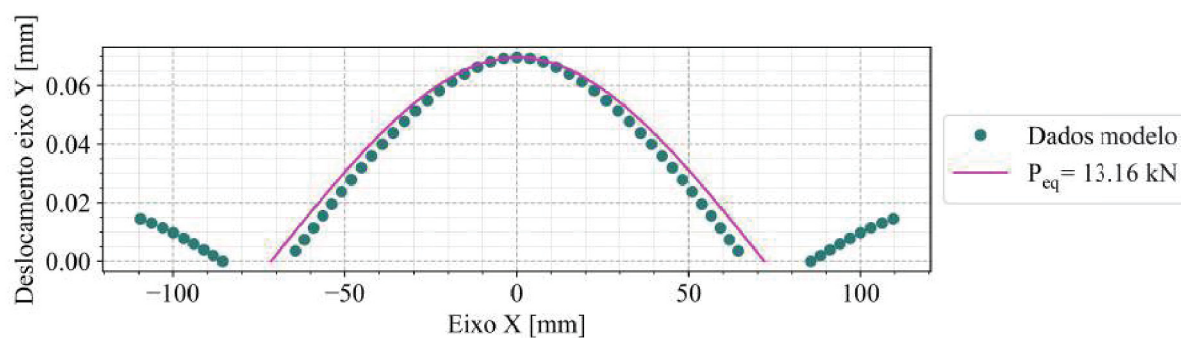


FIGURA 199 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

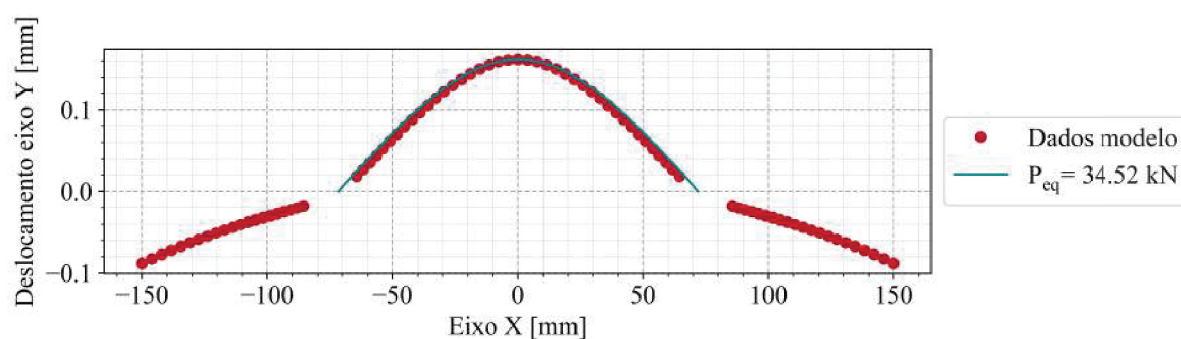


FIGURA 200 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

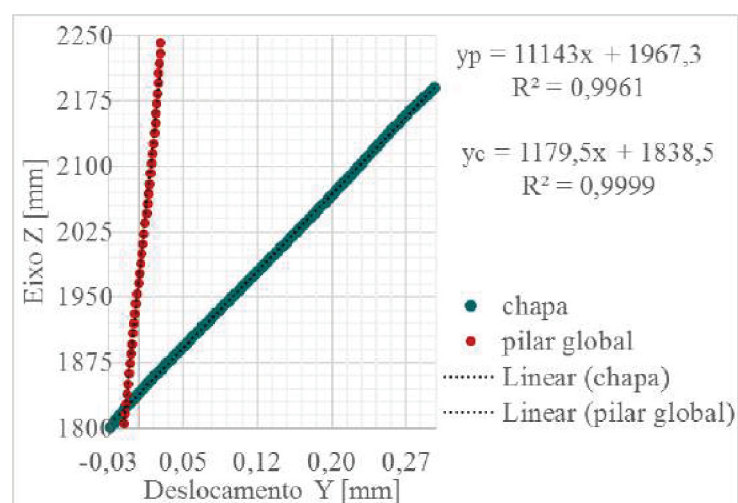
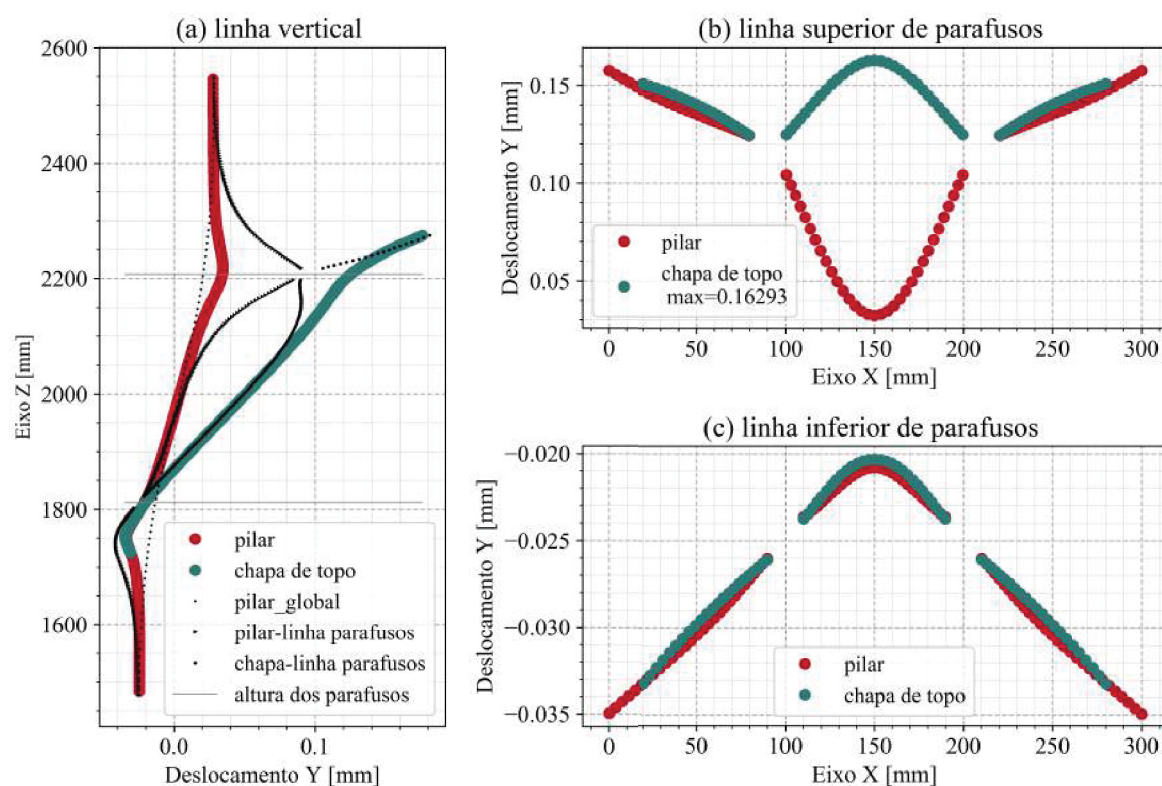
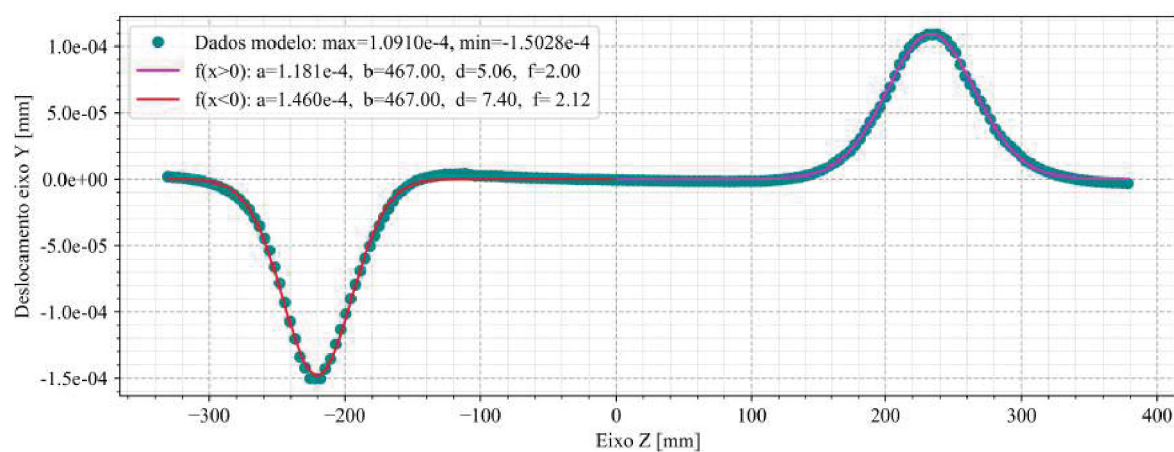


FIGURA 201 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS450X51_4φ19_ch12+g

CVS400x87_VS500X61_4 ϕ 19_ch12-gFIGURA 202 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS500X61_4 ϕ 19_ch12-gFIGURA 203 – Deformação da alma do pilar, ligação CVS400x87_VS500X61_4 ϕ 19_ch12-g

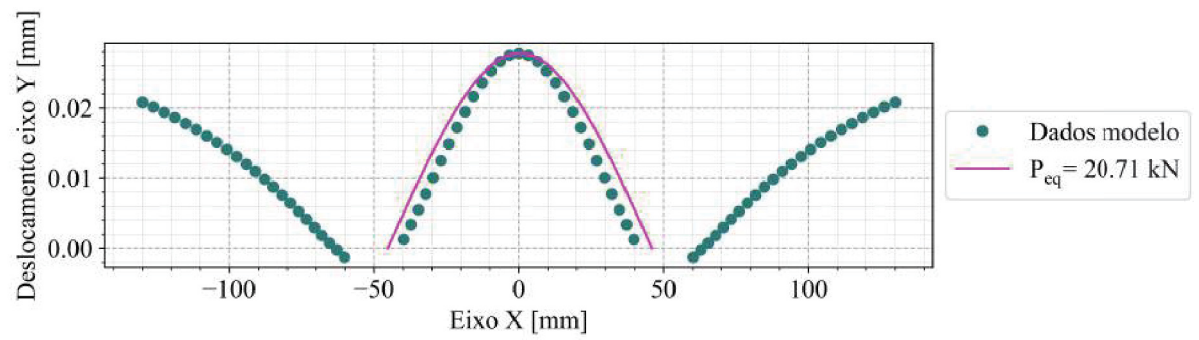


FIGURA 204 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha horizontal dos parafusos superiores, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g

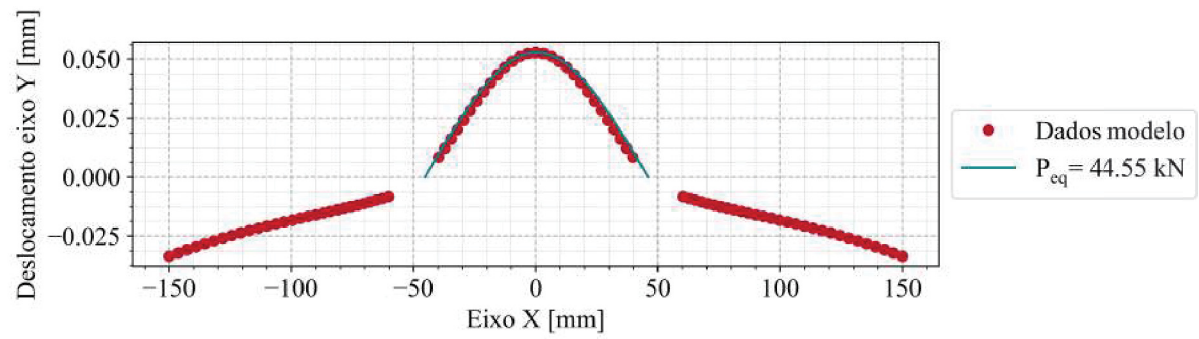


FIGURA 205 – Deslocamentos da mesa do pilar (a) e chapa de topo (b) na linha horizontal dos parafusos superiores, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g

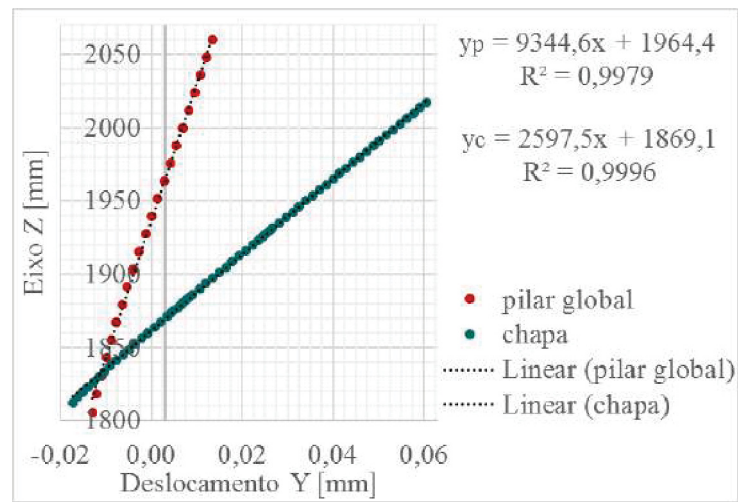
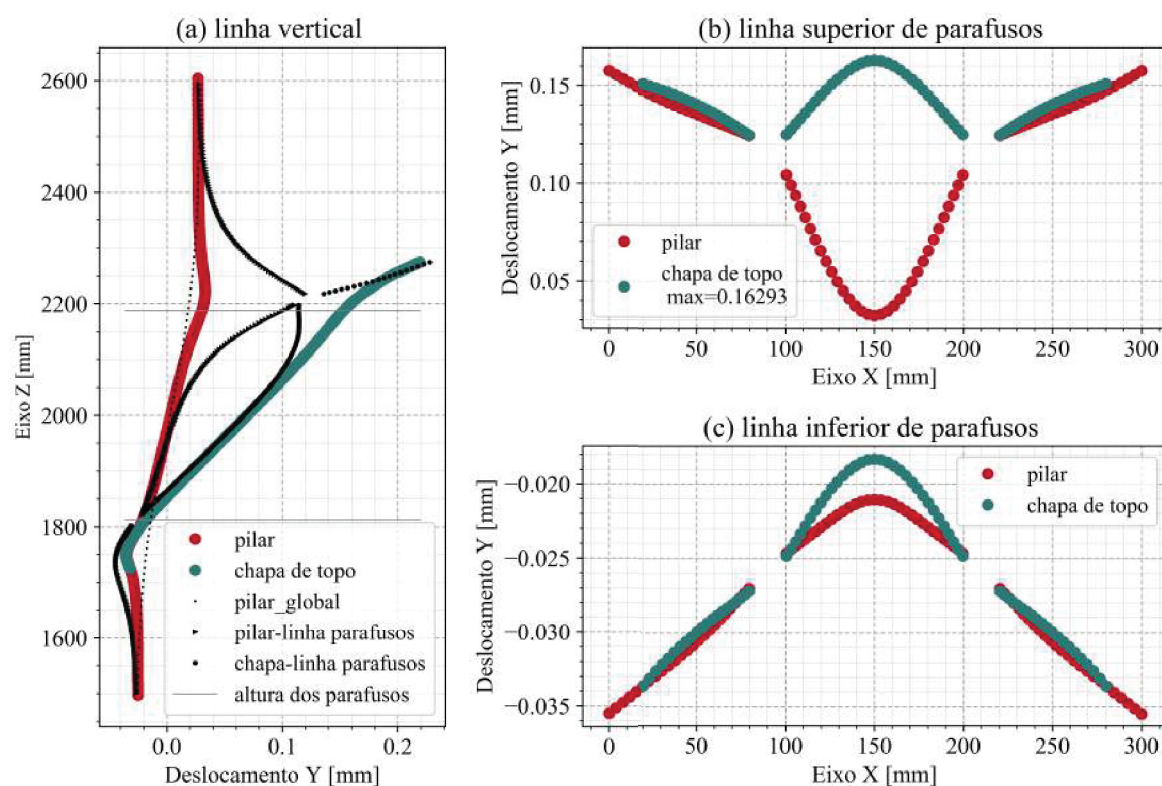
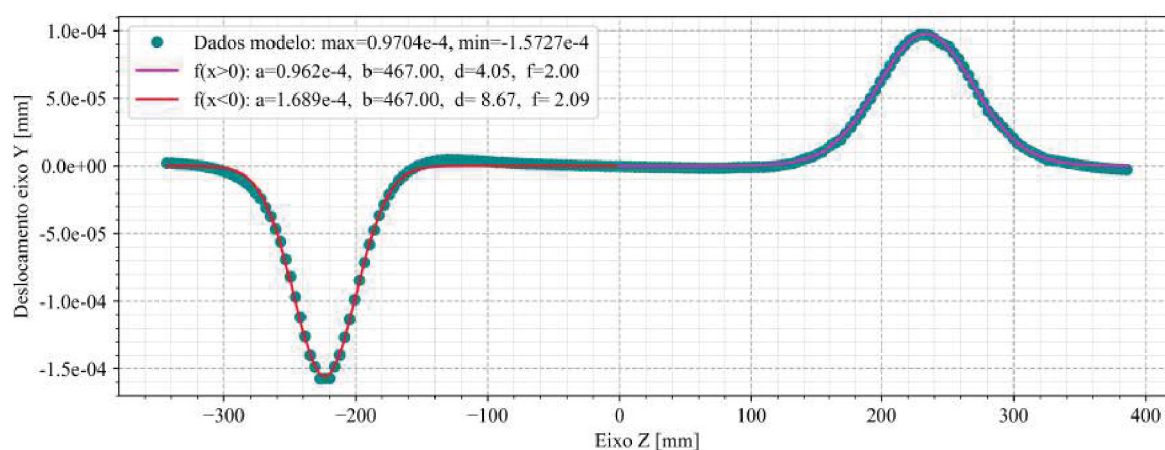


FIGURA 206 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12-g

CVS400x87_VS500X61_4 ϕ 19_ch12FIGURA 207 – Deslocamentos apresentados pela ligação CVS400x87_VS500x61_4 ϕ 19_ch12FIGURA 208 – Deformação da alma do pilar da ligação CVS400x87_VS500X61_4 ϕ 19_ch12

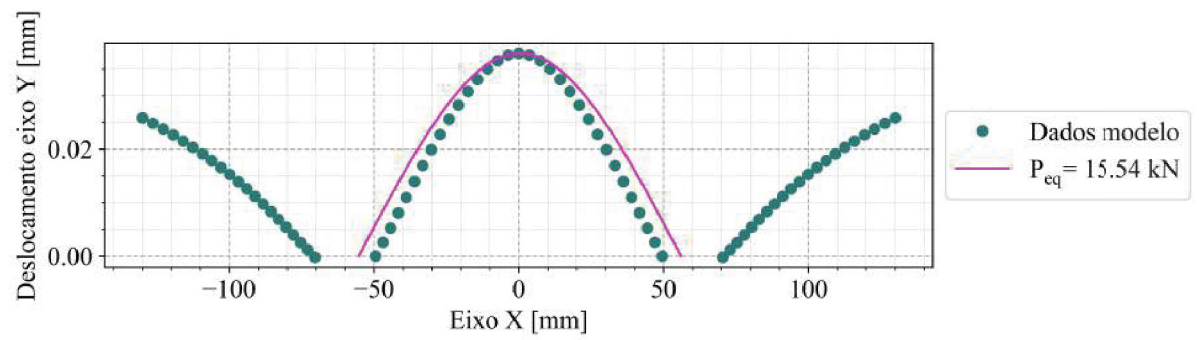


FIGURA 209 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12

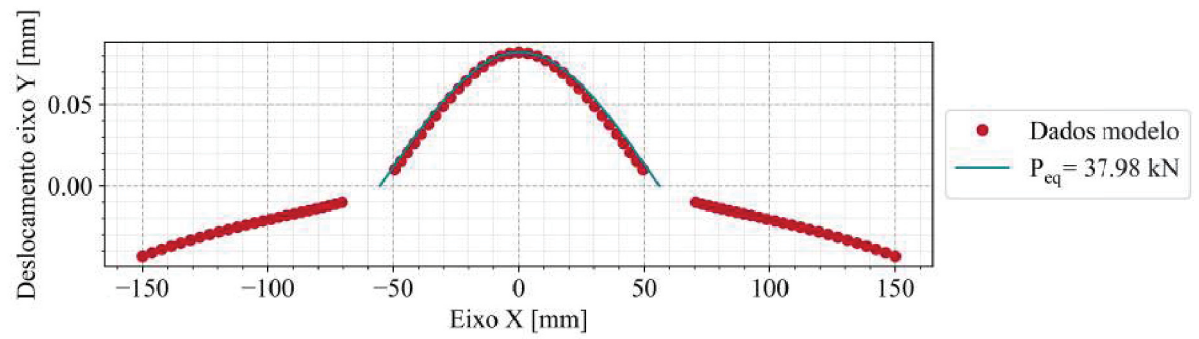


FIGURA 210 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12

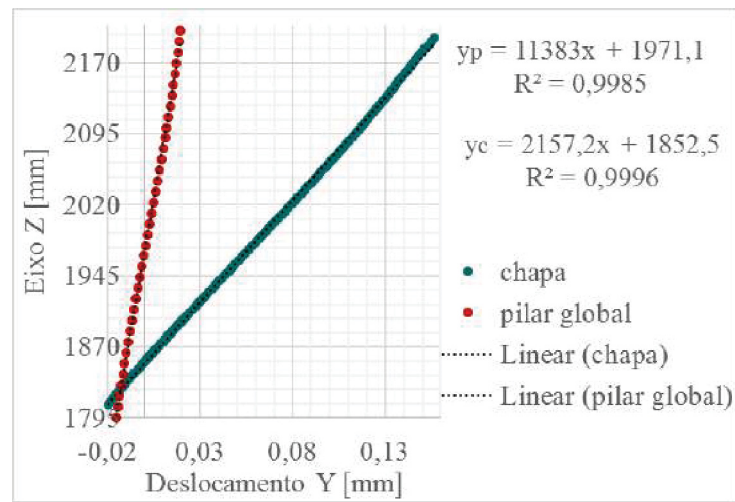


FIGURA 211 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12

CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g

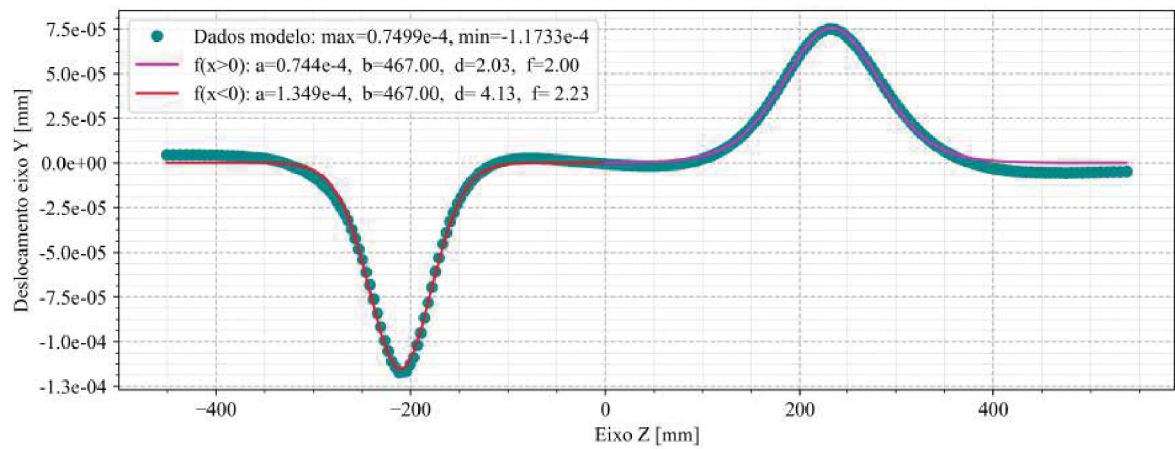


FIGURA 212 – Deformação da alma do pilar da ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g

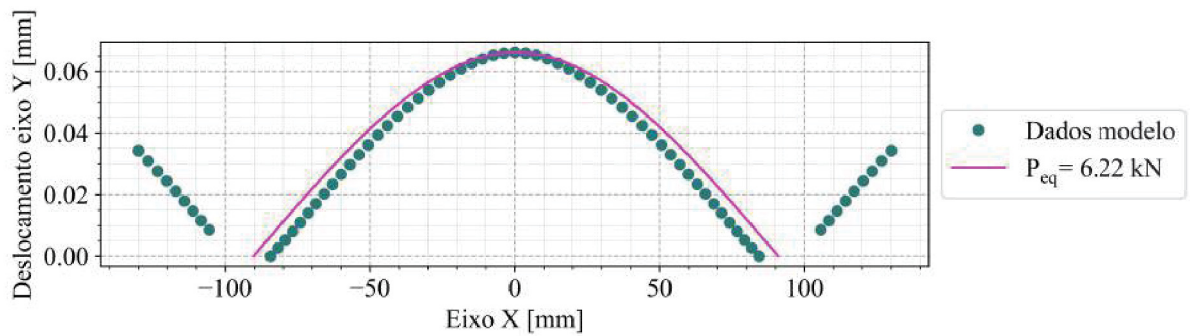


FIGURA 213 – Deslocamentos da chapa de topo na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g

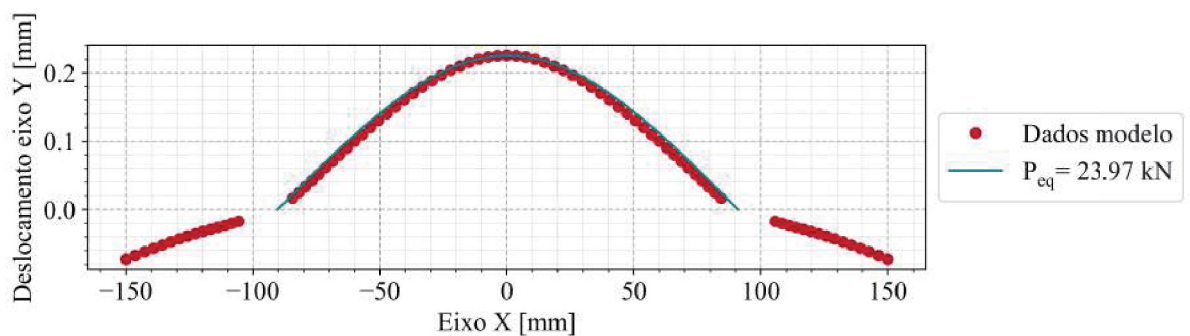


FIGURA 214 – Deslocamentos da mesa do pilar na linha horizontal superior de parafusos, ligação CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g

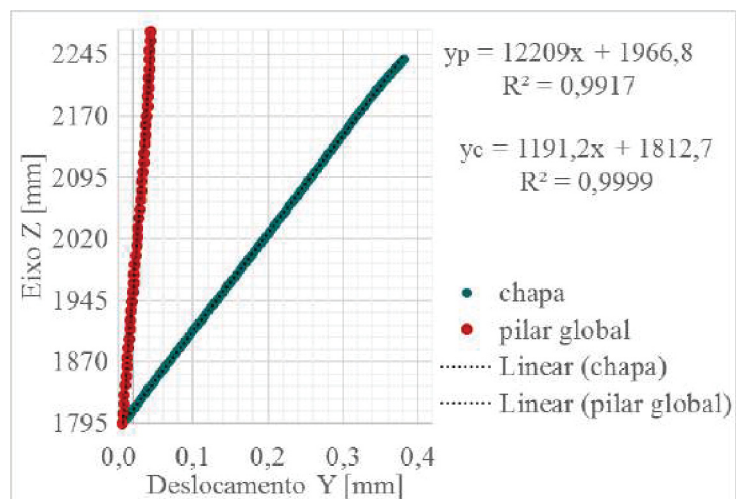


FIGURA 215 – Ângulo de rotação relativa entre chapa de topo e pilar global, CVS400x87_VS500X61_4φ19_ch12+g

ANEXO A – TABELAS PARA O CÁLCULO DO COMPRIMENTO EFETIVO DOS PERFIS “T” EQUIVALENTES

Obs.: as tabelas apresentadas neste anexo foram adaptadas de Romano, 2001.

Tabela 1- Comprimento equivalente para linhas de parafusos atuando isoladas BCSA/SCI (1996)

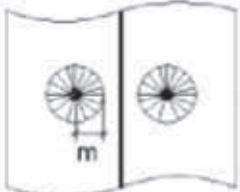
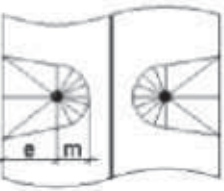
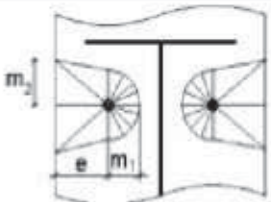
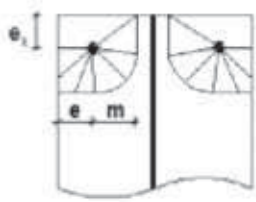
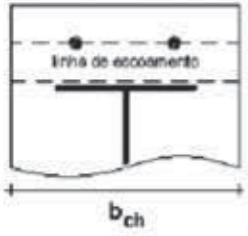
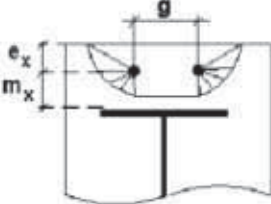
Linha de parafusos separados por alma na mesa do pilar ou chapa de topo	
	<p><i>Modelo i</i> <i>Escoamento circular</i></p> $L_i = 2\pi \cdot m$
	<p><i>Modelo ii</i> <i>Escoamento lateral</i></p> $L_{ii} = 4m + 1,25e$
	<p><i>Modelo iii</i> <i>Escoamento lateral próximo à mesa da viga ou enrijecedor</i></p> $L_{iii} = \alpha \cdot m_1$
	<p><i>Modelo iv</i> <i>Escoamento de bordo</i></p> $L_{iv} = 2m + 0.625e + e_x$

Tabela 2- Comprimento equivalente para linhas de parafusos atuando isoladas BCSA/SCI (1996)

Linha de parafusos na extensão da chapa de topo	
	<p><i>Modelo v</i> <i>Escoamento em dupla curvatura</i></p> $L_v = \frac{b_{ch}}{2}$
	<p><i>Modelo vi</i> <i>Escoamento em conjunto</i></p> $L_{vi} = 2m_x + 0.625e_x + \frac{g}{2}$

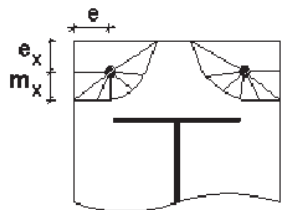
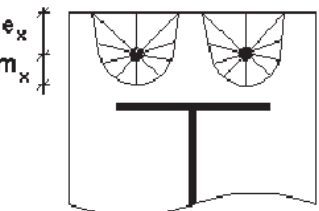
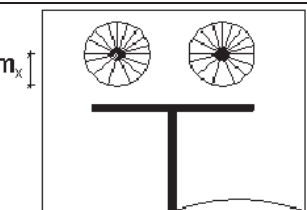
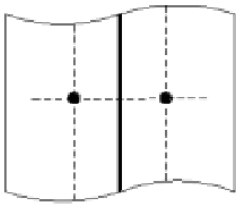
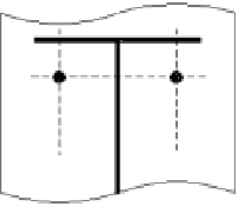
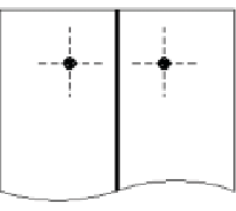
Linha de parafusos na extensão da chapa de topo	
	<p><i>Modelo vii</i> <i>Escoamento de bordo</i></p> $L_{vii} = 2m_x + 0.625e_x + e_v$
	<p><i>Modelo viii</i> <i>Escoamento individual</i></p> $L_{viii} = 4m_x + 1.25e_x$
	<p><i>Modelo ix</i> <i>Escoamento circular</i></p> $L_{ix} = 2 \cdot \pi \cdot m_x$

Tabela 3- Comprimento efetivo para linhas de parafusos atuando isoladas

Linha de parafusos locada na mesa do pilar ou chapa de topo	
	<p><i>Linha de parafusos não influenciada por enrijecedor ou extremidade livre</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{L_i, L_{ii}\}$
	<p><i>Linha de parafusos próxima à mesa da viga ou enrijecedor</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{\text{Max}\{L_{ii}, L_{iii}\}, L_i\}$
	<p><i>Linha de parafusos próxima à extremidade livre</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{L_{iv}, L_{ii}, L_i\}$

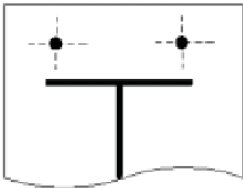
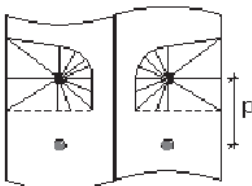
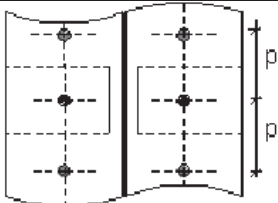
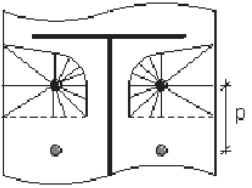
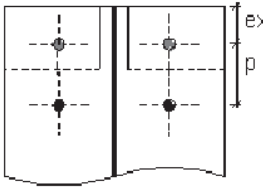
Linha de parafusos locada na mesa do pilar ou chapa de topo	
	<p><i>Linha de parafusos na extensão da chapa de topo</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{L_v, L_{vi}, L_{vii}, L_{viii}, L_{ix}\}$

Tabela 4- Comprimento efetivo para linhas de parafusos atuando em conjunto

Grupo de parafusos locados na mesa do pilar ou chapa de topo	
	<p><i>Linha superior de um grupo não influenciado por enrijecedor ou mesa de viga</i></p> $L_{eff} = \frac{L_{ii}}{2} + \frac{p}{2}$
	<p><i>Linhas intermediárias de um grupo</i></p> $L_{eff} = p$
	<p><i>Linha do topo de um grupo influenciado por enrijecedor ou mesa de viga</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{\frac{L_{ii}}{2}, (L_{iii} - \frac{L_{ii}}{2})\} + \frac{p}{2}$
	<p><i>Linha de parafuso de um grupo próxima à extremidade livre</i></p> $L_{eff} = \text{Min}\{e_x, \frac{L_{ii}}{2}\} + \frac{p}{2}$